

## ФОРМИРОВАНИЕ МОЩНЫХ ИМПУЛЬСОВ ГАММА - ИЗЛУЧЕНИЯ С ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ 0,03÷3 МКС В ТЕХНОЛОГИИ РАДИАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

### FORMING OF HIGH POWER PULSES OF GAMMA RADIATION WITH DURATION IN THE RANGE FROM 0,03 TO 3 MCS IN THE TECHNOLOGY OF RADIATION INVESTIGATIONS.

*Д. М. Иващенко, В. А. Каменский, Н. Г. Мордасов, А. П. Метелёв, А. А. Фёдоров,  
Н. И. Филатов, А. М. Членов*  
*D. Ivaschenko, V. Kamensky, N. Mordasov, F. Metelev, A. Fedorov, N. Filatov, A. Chlenov*

Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Научно-исследовательский институт приборов»  
Federal state unitary enterprise «Research Institute of Scientific Instruments»

Осуществлена модернизация ускорителя УИН-10, позволившая повысить воспроизводимость характеристик импульса гамма -излучения посредством использования катодного разрядника в цепи перед вакуумным диодом. Показано, что обостряющий разрядник не оказывает существенного влияния на формирование длительности импульса гамма-излучения. Предложена методика формирования длительности импульса гамма-излучения в диапазоне 0,03–0,15 мкс при неизменной мощности дозы, в основу которой положено формирование переднего фронта импульса посредством изменения параметров электровзрывного прерывателя, а заднего фронта – посредством использования «срезающего» разрядника в цепи системы формирования импульса.

An upgrading of the accelerator UIN-10 which permits to raise the reproducibility of gamma radiation pulse characteristics by utilization of a cathode discharger placed before the vacuum diode is realized. The sharpening discharger was demonstrated to have inessential impact on the forming of the gamma radiation pulse duration. A method for the forming of gamma radiation pulse duration with invariable dose rate is proposed. The basis for this method is shaping of the pulse rise-up portion by means of varying of parameters of an electroblasting interrupter and descending part of the pulse through the utilization of a clipping discharger installed in the pulse-shaping system.

#### Введение

Существующая потребность технологий массовых радиационных испытаний и исследований в использовании импульсного гамма-излучения с различной длительностью при мощности  $10^{12}$  Р/с и более, инициировала создание в РФ линейных ускорителей и ускорителей прямого действия с выходной мощностью в гига- и тераваттном диапазоне.

Приоритет в их использовании принадлежит высокопроизводительным, экономичным, простым в настройке режимов, ремонте и обслуживании [3].

Настраиваемые параметры формирующей системы подобных ускорителей определяют, как режим их работы, так и обусловленные этим

режимом выходные амплитудно-временные, спектрально-энергетические и интегральные характеристики импульса гамма-излучения, создавая определённое разнообразие режимов испытаний (по длительности импульса) по сравнению с использованием линейных ускорителей.

Определённым недостатком подобных ускорителей является невысокая воспроизводимость характеристик воздействующих факторов от импульса к импульсу в заданном режиме испытаний (мощность дозы в импульсе, доза за импульс, длительность импульса, энергетический спектр излучения), что обусловлено, в целом, неглубокой проработкой проблем электромагнитной совместимости на стадии конструирования системы формирования импульса (СФИ) и ускорительной трубки (УТ) [4].

С другой стороны, современные методики радиационных испытаний требуют формирования

импульсов гамма-излучения моделирующей установкой в диапазоне длительности  $0,01 \div 3,0$  мкс при неизменном диапазоне мощности дозы. В настоящее время эти требования не реализованы ни на одном из приведённых выше типов ускорителей.

Детализация и решение ряда задач, связанных с формированием импульса гамма-излучения различной длительности и повышением воспроизводимости параметров воздействующих факторов этого излучения, осуществлялись на ускорителе УИН-10 посредством модернизации в процессе его текущей эксплуатации.

Противоречивые требования в энергоёмких системах к ограничению зарядного напряжения и повышению скорости вывода энергии в ускорителе УИН-10 реализованы посредством создания гибридной комбинации двух накопителей энергии для получения высокой пространственно-временной концентрации её в нагрузке и достижения максимальной эффективности преобразования запасаемой энергии в энергию электронного или гамма-излучения.

Используемая в ускорителе УИН-10 комбинация накопителей энергии (рис. 1), состоит из первичного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) как генератора импульсного напряжения (ГИН) 1, собранного на базе конденсаторов ИК100-0,4 по схеме Аркадьева-Маркса с запасаемой энергией  $\approx 500$  кДж и промежуточного сильноточного импульсного индуктивного накопителя (ИНЭ) 2 в виде соленоида с индуктивностью 11 мкГн. Накопители размещены в отдельных камерах 3 и 4, заполненных трансформаторным маслом и последовательно соединены посредством проходной высоковольтной диафрагмы 5. Последовательно с ИНЭ в камере 4 размещён газовый обостряющий разрядник (ОР) 6 СФИ.

Выход ИНЭ 2 соединён с электрически взрываемым прерывателем тока (ЭВП) 7 проволочного типа, формируемым из набора однотипных проводников в пространственно ограниченной и изолируемой воздушной среде, внутри трубы 8, а также сводом ОР 6. Система жёсткого соединения ЭВП-ИНЭ-ОР («тройник») удерживается в камере 4 на опорном изоляторе (ОИ) 9. Выход ОР 6 соединен с ускорительной трубкой (УТ), состоящей из проходного высоковольтного изолятора (ПВИ) 10, коаксиальной вакуумной линии (КВЛ) 11 (диаметр 100 см, длина 600 см), высоковольтного электрода 12, переходящего в катод 13 вакуумного диода (ВД). Пространство за выводным окном ускорителя 14 ограничено металлическим облучательным боксом 15, расположенным в бетонной защите 16.

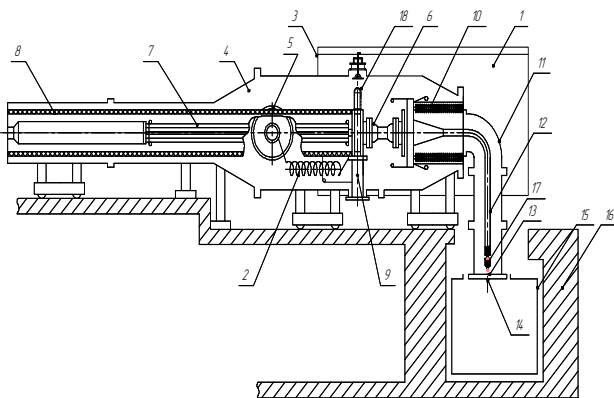


Рис. 1. Структурная схема ускорителя УИН-10

В табл. 1 представлены параметры импульса гамма-излучения некоторых типовых режимов работы ускорителя, ранее используемых для проведения радиационных исследований ( $D_{0,5}$  и  $D_{100}$  – экспозиционная доза за импульс на расстоянии 0,5 и 100 см от мишени по оси излучения;  $t_{эф}$  – эффективная длительность импульса;  $\delta$  – максимальное относительное отклонение параметра (при доверительной вероятности 0,95).

Таблица 1

Характеристики импульса гамма-излучения типовых режимов работы ускорителя

Режим	$D_{0,5}, P$	$\delta, \%$	$D_{100}, P$	$\delta, \%$	$t_{эф}, \text{мкс}$	$\delta, \%$
I	12200	55	233	24	0,15	8,7
II	100500	67	78	69	0,09	43
III	24780	61	44	46	2,7	26

Невысокое воспроизведение параметров гамма-излучения ускорителя при работе в режимах I и II, характеризующихся формированием импульса высокого напряжения на УТс использованием ЭВП (в режиме III ЭВП не используется) при различных конструкциях катода и рабочего зазора ВД, проявляется и в других подобных режимах с более высоким уровнем запасаемой энергии ЕНЭ.

Наиболее вероятной причиной этого может быть дестабилизация работы ВД, обусловленная наличием неконтролируемого, но значительного по величине и длительности предимпульса напряжения на ускоряющей промежутке ВД. Формируемые на ЭВП импульсы напряжения и тока (режим I и II) приведены на рис. 2. Импульс напряжения формируется на ЭВП вследствие резкого обрыва тока, а предимпульс (часть импульса напряжения на ЭВП до обрыва тока), через конструктивные ёмкости ОР и КВЛ передаётся к

зазору ВД, вызывая эмиссию плазмы, изменяющей реальную конфигурацию его ускоряющего зазора к приходу основного импульса. Подобный эффект является характерной особенностью рассматриваемых ускорителей прямого действия этого типа [1, 2].

Фронт импульса напряжения имеет переменную крутизну нарастания. Если фронт импульса напряжения разбить на участки, то крутизна нарастания импульса, формируемого на ЭВП ускорителя УИН-10, изменяется от  $3,0 \cdot 10^{11}$  В/с до  $6 \cdot 10^{13}$  В/с.

В процессе работы составные части электрофизических узлов ускорителя будут испытывать влияние электромагнитных полей, создаваемых ЭВП с амплитудно-временными параметрами одного порядка [3], что создаёт условия для формирования предимпульса на ВД.

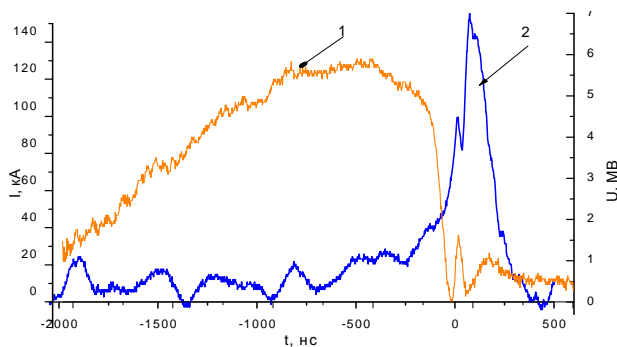


Рис. 2. Импульс тока и напряжения на ЭВП. 1 – ток; 2 – напряжение

Как следует из табл. 1, ускоритель УИН-10 не обеспечивает при проведении исследований и испытаний длительность импульса гамма-излучения менее 90 нс (режим II), что является определённым ограничением при его использовании в радиационных технологиях.

Реконструкция СФИи УТ предусматривала внедрение в конструкцию узлов, обеспечивающих повышение воспроизводимости амплитудно-временных характеристик гамма-излучения в типовых режимах работы ускорителя и расширение линейки режимов испытаний по длительности импульса в диапазоне  $0,03 \div 3$  мкс:

- однокаскадного газового ОР 6, вместо используемого двухкаскадного, с идентичными функциями формирования импульса гамма-излучения;

- катодного разрядника (КР) 17 (рис. 1), устанавливаемого в центральном электроде КВЛ перед катодом 13 ВД в целях снижения напряжения предимпульса;

- срезающего разрядника (СР) 18, устанавливаемого между ЭВПи ОР и обеспечивающего задачу формирования заднего фронта импульса гамма-излучения;

- усовершенствованного зарядного устройства ЭВП 7 для его одновременной комплектации в количестве до 90 проводников диаметром  $0,07 \div 0,2$  мм и длиной до 11 м, служащего в конечном результате для формирования параметров импульса гамма-излучения.

Используемый в СФИ ускорителя УИН-10 двухкаскадный газонаполненный ОР существенно снижает напряжение на ВД (до 20%), формирует сравнительно длинный фронт импульса напряжения, оказывая влияние на спектрально-энергетические характеристики формируемого импульса гамма-излучения [2].

Для повышения эффективности его работы как функционального узла СФИ создана конструкция однокаскадного газового разрядника, представленная на рис. 3.

Рабочие электроды ОР 1, 2 изготовлены из нержавеющей стали и выполнены в форме двух полусфер (одна внутри другой). Для формирования более высокой напряжённости поля в рабочем зазоре разрядника потенциальный электрод 2 выполнен в виде полусферы меньшего диаметра со встроенным дополнительным электродом 3, находящимся под плавающим потенциалом и создающим разность потенциалов (за счёт конструктивных ёмкостей) в зазоре с рабочим электродом 2, инициирующую при пробое развитие многоканального разряда.

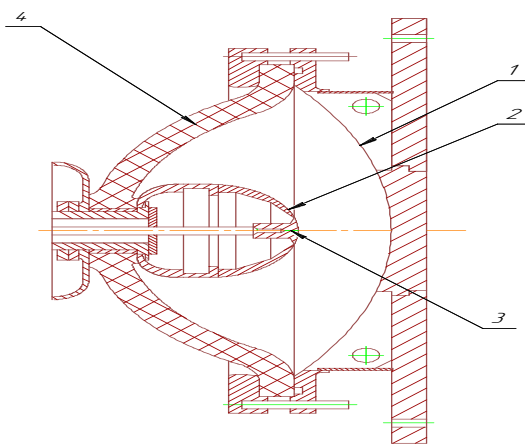


Рис. 3. Конструкция газового обостряющего разрядника

Изоляционная диафрагма 4 изготовлена в виде полусферы из эпоксидного компаунда. В качестве рабочей среды в ОР используется элегаз ( $SF_6$ ) при давлении до 6 ати. Пробивное импульсное напря-

жение при предельном рабочем давлении достигает 10 МВ при рабочем зазоре 150 мм. Обостряющий разрядник обеспечивает фронт коммутации  $15 \pm 5$  нс.

Конструкция КРС обозначением электрических емкостей межэлектродных промежутков ОР -  $C_{ор}$ , КВЛ -  $C_{квл}$ , КР -  $C_{кр}$  и ВД -  $C_{вд}$  представлена на рис. 4. Разрядник выполнен в виде двух стальных стаканов (1 и 2) с внешним диаметром 86 мм и внутренним диаметром 70 мм, обращённых друг к другу кромками и размещённых на капролоновой шпильке-изоляторе 3. Шпилька позволяет изменять зазор КР в диапазоне 0÷80 мм. Кромки стаканов оканчиваются тороидальными кольцевыми электродами 4, 5 с внешним диаметром 104 мм. Верхний электрод разрядника 4 соединяется с высоковольтным электродом КВЛ, нижний 5 – выполнен в виде полусферы со штырем на конце и, по сути, переходит в катод ВД. Анод ВД 6, служит одновременно мишенью-конвертером ускорителя.

До момента срабатывания ОР от основного импульса напряжение предимпульса распределено на ёмкостях межэлектродных промежутков в ускорительной трубке.

В реальных условиях  $C_{квл} \gg C_{кр}$ ,  $C_{вд}$ , а  $C_{кр} \ll C_{вд}$ , поэтому напряжение на ВД ( $U_{вд}$ ) при использовании КР существенно ниже напряжения на КВЛ ( $U_{квл}$ ) и может быть оценено по формуле:

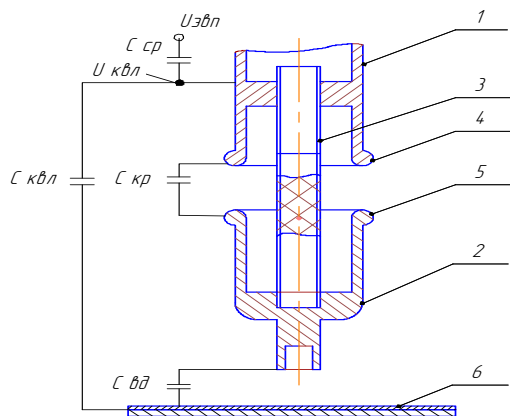


Рис. 4. Конструкция катодного разрядника

Принцип работы, конструкция срезающего разрядника и место установки определялись исходя из особенностей конструкции СФИ ускорителя в камере 4 (рис. 1), заполненной трансформаторным маслом. Решение задачи осуществлено посредством разработки бескорпусного масляного разрядника с регулируемым зазором, размещаемого в камере 4 СФИ перед ОР так, чтобы избежать прямого воздействия гидроудара на изоляционную диафрагму ОР, возникающего при работе СР.

Подобное включение в СФИ СР позволяет значительно уменьшить сопротивление формируемой им при срабатывании разрядной цепи и снизить ток в нагрузке (ВД) практически до нуля, обеспечив увеличение сопротивления канала ОР при снижении на нем напряжения за счет срабатывания СР, облегчая условия работы ПВИ и ОИ.

Формирование квазиоднородного поля в рабочем зазоре СР, обеспечивающего его стабильную работу, реализуется конфигурацией системы электродов сфера-плоскость (рис. 5), в которой коэффициент усиления поля зависит от диаметра сферы и расстояния между электродами. Конструкция СФИ и место установки СР, дают возможность в качестве одного электрода использовать выносную полусферу 2 диаметром 200 мм и диск 3 диаметром 350 мм в качестве второго. Это позволяет получить квазиоднородное поле в межэлектродном промежутке 1 от 50 до 160 мм. Полусферический электрод СР устанавливается на соединении между ЭВП и ОР (рис. 1), которое имеет жёсткое крепление с ОИ. Диск электрод 3 (рис. 5) установлен на подвижном металлическом штоке 4, который позволяет регулировать расстояние между электродами СР 1 в диапазоне 0÷220 мм.

Известно [5], что для создания многоканальной коммутации в трансформаторном масле, которая дает возможность увеличения крутизны среза заднего фронта рабочего импульса напряжения ускорителя за счет уменьшения индуктивного сопротивления СР, необходимо подать на высоковольтный электрод разрядника импульс напряжения с крутизной  $du/dt \geq 2 \cdot 10^{13}$  В/с, что вполне обеспечивает ЭВП УИН-10.

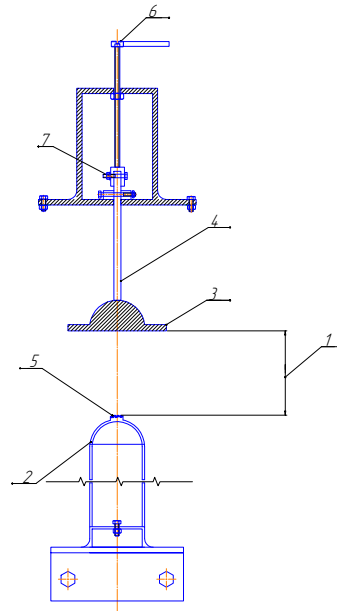


Рис. 5. Конструкция масляного срезающего разрядника

Для развития разряда с отрицательного высоковольтного электрода 2 необходимо, чтобы величина коэффициента усиления электрического поля на его поверхности была в 3 раза больше по сравнению с подобным коэффициентом на поверхности положительного (заземленного) электрода 3 [6]. С этой целью на поверхности сферического электрода 2 площадью  $30 \text{ см}^2$  в форме наборного квадрата сформированы острия 5 высотой 6 мм. Величина зазора в СР регулируется с помощью ходового винта 6, соединенного со штоком разрядника 7. Ходовой винт позволяет регулировать величину зазора в разряднике с точностью до 1 мм.

Проведенная экспериментальная проверка разработанной конструкции КР, установленного в цепи ВД при работе ускорителя УИН-10 в режиме II в серии из 20 импульсов показала, что напряжение предимпульса на ВД уменьшается в 5 раз, в соответствии с приведенной выше формулой ( $C_{кр} \approx 0,2C_{вд}$ ). Время возникновения эмиссии плазмы на катоде ВД смещается к приходу основного импульса, что существенно стабилизирует условия работы ВД посредством снижения степени воздействия плазмы от предимпульса на величину ускоряющего промежутка до прихода основного импульса и повышает воспроизводимость характеристик формируемого импульса гамма-излучения в выбранном режиме работы ускорителя:

- разброс величины экспозиционной дозы на расстояниях 0,5 и 100 см от мишени уменьшился до 30%;

- разброс величины мощности экспозиционной дозы на расстояниях 0,5 и 100 см от мишени уменьшился до 28 %;

- эффективная длительность импульса гамма-излучения практически не изменилась при снижении разброса до 14 %;

- разброс длительности переднего фронта импульса гамма-излучения уменьшился до 8 %.

Конструктивно размыкатель ЭВП 7 (рис. 1) ускорителя формируется в воздушном пространстве, ограниченном полиэтиленовой трубой 8 с внутренним диаметром 1 м и длиной 11 м, помещённой в контейнер 4 СФИ с трансформаторным маслом и примыкающей с одного торца к выходу ИНЭ, позволяя осуществлять снаряжение до 90 проводников различного сечения в условиях их аксиальной симметрии.

В экспериментах, проведенных с изменением геометрических параметров размыкателя ЭВП при отработке режимов работы ускорителя УИН-10, основанных на результатах расчётов магнитогидродинамической модели электровзрыва проводника [7] подтверждено, что варьированием параметров

размыкателя ЭВП, следовательно, момента подключения нагрузки, можно изменять в ней длительность переднего фронта и временные параметры импульса тока. Амплитуда импульса тока в нагрузке определяется главным образом суммарным сечением проводников и напряжением на размыкателе. Наибольшее обострение тока в нагрузке наблюдается при оптимальных размерах проводников при подключении нагрузки в максимуме напряжения на ЭВП. Скорость передачи энергии в нагрузку практически не зависит от суммарной толщины проводников ЭВП, но резко зависит от длины проводников, соотношения индуктивностей нагрузки и ИНЭ, а также напряжения на размыкателе. Наибольшие скорости передачи энергии в нагрузку достигаются при малой величине соотношения индуктивностей.

Эксперименты с модернизированным размыкателем ЭВП подтвердили, что длительность переднего фронта импульса тока  $t_f$  в ВД, его эффективная длительность  $t_{эф}$ , а, следовательно, идентичные параметры импульса гамма-излучения, находятся в определённой зависимости от параметров размыкателя ЭВП (количество и длина проводников, их диаметр при неизменном суммарном сечении).

Результаты исследований проведенные в условиях ускорителя УИН-10, позволили установить зависимость переднего фронта  $t_f$  и эффективной длительности  $t_{эф}$  импульса гамма-излучения от диаметра медных проводников при их неизменной длине и суммарном сечении (рис.6). Как следует из рисунка, отношение эффективной длительности импульса к длительности фронта практически не изменяется.

Дальнейшее уменьшение диаметра проводников размыкателя ЭВП ( $\varnothing < 0,07 \text{ мм}$ ) осложняется технологическим процессом формирования размыкателя, поэтому воздействие на процесс изменения длительности импульса гамма-излучения, посредством укорочения его переднего фронта с помощью используемого метода, ограничен.

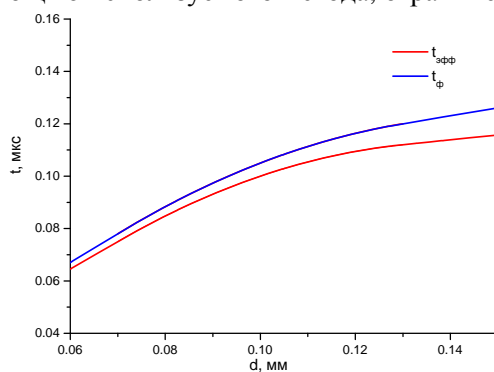


Рис. 6. Параметры импульса гамма-излучения ускорителя УИН-10



Исследование работы однокаскадного ОР проводилось в диапазоне изменения давления в ОР  $P = 1,8 \div 4,5$  ати, при других неизменных исходных параметрах режима II (табл. 1) работы ускорителя с регистрацией и обработкой измерений с помощью диагностической системы ускорителя [8].

Как следует из результата экспериментов (рис. 7), эффективная длительность импульса гамма-излучения медленно уменьшается в исследуемом диапазоне роста давления в ОР, при этом существенно уменьшается длительность его переднего фронта.

Уменьшение длительности фронта импульса гамма-излучения при возрастании давления в ОР, может быть объяснено ростом числа каналов коммутации в нём, поскольку время нарастания (передний фронт) импульса тока  $t_{\Phi}$  определяется соотношением [3]:

$$t_{\Phi} = 2,2 (\tau_R + \tau_L),$$

$$\text{где, } \tau_L = \frac{L}{nZ}, \quad \tau_R = \frac{5}{E^{4/3} (nZ)^{1/3}};$$

$\tau_L$  – индуктивная составляющая времени нарастания;

$\tau_R$  – активная составляющая времени нарастания;

$E$  – средняя напряжённость электрического поля в зазоре разрядника (МВ/см);

$Z$  – импеданс источника (Ом);

$L$  – индуктивность одного канала;

$n$  – число каналов коммутации.

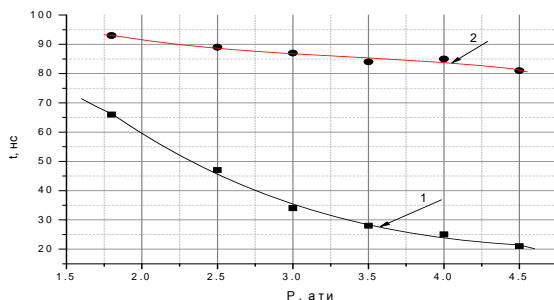


Рис. 7. Временные характеристики импульса гамма-излучения: 1 – длительность переднего фронта; 2 – эффективная длительность

Амплитудно-временные и спектрально-энергетические характеристики воздействующих факторов, полученных с помощью диагностического комплекса [8], при давлении в ОР 4,5 ати представлены на рис. 8.

Полученная информация позволяет утверждать, что с ростом давления в ОР повышается напряжение его срабатывания, увеличивается время задержки подключения нагрузки и возрастает эффективность использования магнитной энергии ИНЭ в нагрузочной цепи.

На рис. 9 приведены осциллограммы импульсов мощности дозы гамма-излучения 1, тока в СР 2 и напряжения на СР 3 при рабочем зазоре 130 мм, полученные при работе ускорителя УИН-10 в режиме II. Видно, что при срабатывании СР резко возрастает ток через СР и спад напряжения на входе ОР. При этом наблюдается коррекция заднего фронта импульса мощности дозы гамма-излучения, который практически совпадает с фронтом спада напряжения на входе ОР.

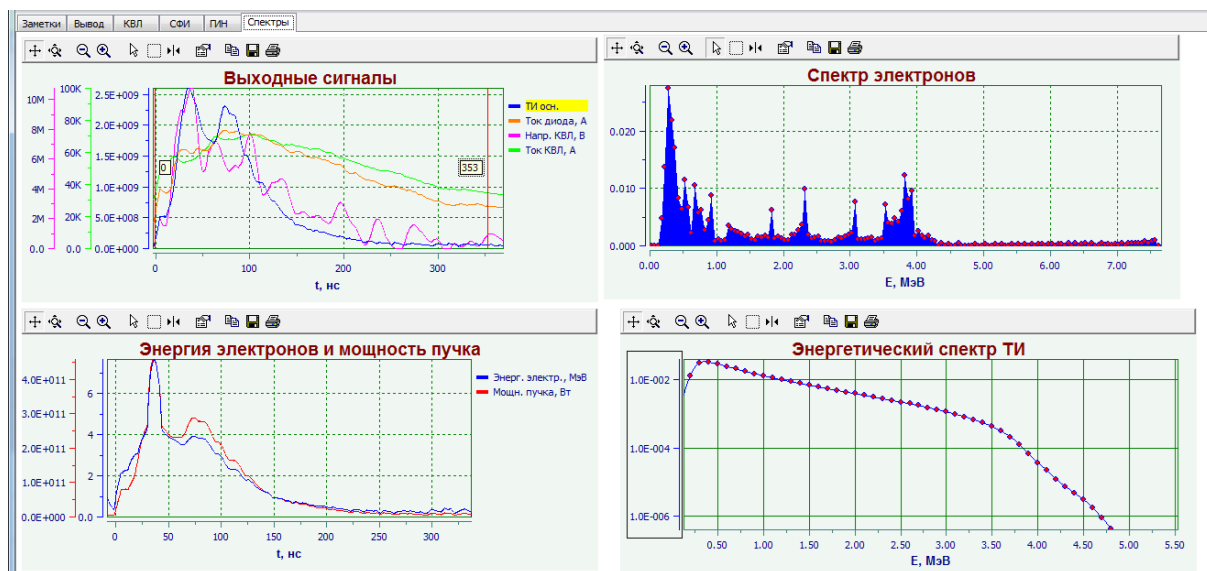


Рис. 8. Амплитудно-временные и спектрально-энергетические характеристики воздействующих факторов

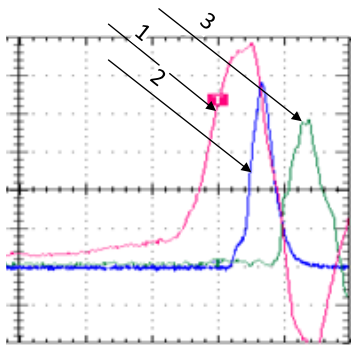


Рис. 9. Оциллограммы импульсов при рабочем зазоре СР 130 мм: 1 – напряжение на СР; 2 – мощность дозы гамма-излучения; 3 – ток в СР

Полученные результаты показывают, что СР при рабочем зазоре 130 мм позволяет получить на ускорителе УИН-10 в режиме генерации сфокусированного пучка электронов эффективную длительность импульса мощности дозы гамма-излучения  $\leq 35$  нс. Мощность экспозиционной дозы на расстоянии 0,5 см и 100 см от мишени остаётся неизменной для выбранного типового режима работы ускорителя (II).

На рис. 10 приведена зависимость эффективной длительности импульса гамма-излучения от величины рабочего зазора СР при работе ускорителя в режиме II (табл. 1).

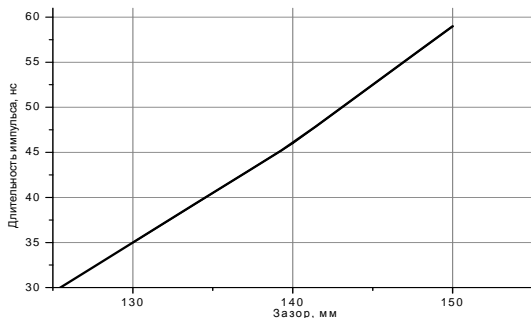


Рис. 10. Зависимость эффективной длительности импульса гамма-излучения от величины рабочего зазора СР

### Выводы

Введение КР в центральный электрод КВЛ перед ВД позволяет существенно снизить напряжение перед импульсом на ВД, стабилизировав его работу, что существенно повышает воспроизводимость характеристик импульса гамма-излучения в заданном режиме работы ускорителя УИН-10.

Полученные экспериментальные результаты (рис. 7) показывают, что характер работы ОР не

оказывает существенного влияния на формирование длительности импульса гамма-излучения, но изменяет его форму (рис. 8). В методологическом плане работа по изменению длительности импульса гамма-излучения осуществлена посредством использования введенных в электрическую схему ускорителя новых технических средств, позволяющих воздействовать на формирование как переднего (размыкатель ЭВП, ОР), так и заднего (СР) фронтов импульсов тока и напряжения на ВД. Как следует из результатов экспериментов (рис. 6, 10), использование гибридной технологии по компрессии переднего фронта импульса гамма-излучения позволяет расширить диапазон формирования длительности импульса от 150 нс до 30 нс.

Длительность переднего фронта импульса гамма-излучения изменяется от  $1,3 \cdot 10^{-7}$  с до  $2 \cdot 10^{-8}$  с, при этом минимальное его значение обусловлено конструктивными особенностями УТ (наличие КВЛ), а задний фронт импульса остаётся неизменным (при использовании СР).

Коаксиальная вакуумная линия эффективно работает в режиме магнитной самоизоляции, время установления которого, в определяющей мере и обуславливает минимальную длительность переднего фронта импульса гамма-излучения.

Задний фронт импульса гамма-излучения определяется временем задержки и срабатывания СР. Разработанный набор методов и средств, внедрённых в СФИ и УТ ускорителя УИН-10, позволяет изменять эффективную длительность импульса гамма-излучения на его выходе без изменения максимальной мощности экспозиционной дозы в диапазоне 30–150 нс, позволяя создавать многообразие режимов работы для проведения испытаний и исследований.

### Список литературы

1. Брыксин В. А., Выскубов В. П., Иващенко Д. М. и др. УИН-10, мощный сильноточный ускоритель электронов для радиационных исследований. // VII Межотраслевая конференция по радиационной стойкости. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ. 2006. С.86–90.
2. Кормилицын А. И., Диянков В. С. Ускоритель ИГУР-3 как источник импульсного фотонного и электронного излучения для радиационных исследований. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. 1996. Вып. 1–3. С. 206–210.
3. Членов А. М., Мордасов Н. Г., Иващенко Д. М. Направление развития эксперименталь-

ной базы по моделированию импульсного гамма-излучения в технологии радиационных испытаний. // ВАНТ. Сер. ФРВРЭА. 2010. Вып.1. С. 5–8.

4. Сборник докладов десятой российской научно-технической конференции по электромагнитной совместимости технических средств и электромагнитной безопасности. //Под ред. д.т.н., профессора Э. Н. Фомича, С-Петербург. 2008. С. 734.

5. У. Бостик, В. Нарди, О. Цукер Накопление и коммутация энергии больших плотностей. М.: Мир, 1979.

6. М. Бейер, В. Бек, К. Мёллер, В. Цаенгель. Техника высоких напряжений: теоретические и

практические основы применения. М.: Энергоатомиздат, 1989.

7. В. П. Ковалёв (ред). Импульсные ускорители электронов с индуктивным накопителем энергии. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2012.

8. Членов А. М., Иващенко Д. М., Мордасов Н. Г. и др. Комплексная диагностика сильного ускорителя в условиях формирования высокоинтенсивного тормозного излучения. //ПТЭ. 2010. Вып. 1. С. 13–19.

9. ПатентRU 2281532G01Т/36. Устройство для комплексного измерения спектрально-энергетических характеристик электронного и тормозного излучения ускорителей /Мордасов Н. Г., Иващенко Д. М., Членов А. М.// БИ 2006. № 22.