

УДК 621.384.6

ИЛТИ — транспортабельный источник мощного импульсного рентгеновского излучения*

Представлены устройство и характеристики генератора импульсного (~ 50 нс) рентгеновского излучения с граничной энергией квантов ~ 700 кэВ и дозой ~ 1 Р на 1 м от мишени. Генератор имеет блочно-разборную структуру и предназначен для оперативной проверки реакции исследуемого объекта в месте его размещения на воздействие излучения в заданные моменты времени, а также для рентгенографического контроля положения деталей объекта за закрывающим его непрозрачным кожухом.

**А. И. Герасимов, К. Ф. Зеленский,
В. В. Кульгавчук, И. А. Трошкин**

Для оперативной проверки работоспособности и реакции аппаратуры при воздействии на нее в заданные моменты времени интенсивного рентгеновского излучения (РИ) длительностью ~ 50 нс, а также для рентгенографического контроля положения деталей объекта за закрывающим его непрозрачным кожухом понадобился транспортабельный надежный источник такого проникающего излучения.

Источник должен быть выполнен в виде синхронизируемого ускорителя импульсного пучка электронов, которые при взаимодействии с мишенью из тяжелого вещества возбуждают из него РИ. Ускоритель должен иметь блочно-разборную структуру с возможностью быстрой разборки его на узлы в работоспособном состоянии, перемещения их на новое место на открытом воздухе или внутри помещения, оперативного соединения здесь узлов между собой и ввода установки в действие. Другие основные требования такие:

- температура окружающего источника воздуха от +40 до -10 °С;
- граничная энергия квантов РИ ~ 700 кэВ;
- доза за импульс на 1 м от анода $\geq 1 \text{ Р} \pm 20 \%$;
- доза на 10 см от анода $\geq 150 \text{ Р}$;
- размер фокусного пятна излучения ~ 5 мм;
- частота запусков не реже 1 раза в 5 минут;
- разброс задержки времени срабатывания источника относительно стартового импульса $< \pm 30 \text{ нс}$;
- ресурс включений без разгерметизации излучателя (сильноточного диода) для возможной замены элементов катодного, анодного и выводного устройств ≥ 20 ;
- ресурс срабатываний без профилактики остальных узлов источника ≥ 500 ;
- ввод в действие после соединения всех узлов через ~ 2 часа;
- общий ресурс включений источника $\geq 2 \cdot 10^3$ запусков;
- минимальный уровень рассеянных электромагнитных полей около источника;

- срок службы ≥ 5 лет;
- общая масса источника ≤ 2000 кг;
- максимальная масса одиночного узла – 1300 кг;
- максимальные габариты: длина – 3 м, ширина – 1,5 м, высота – 1 м;
- пожаробезопасность;
- высокая надежность узлов источника;
- простота и удобство обслуживания;
- безопасность персонала.

Выполнение основной части этих требований не вызывало больших сомнений. Однако взаимоисключающими являлись формирование пучка с размером его фокуса 5 мм при указанных энергии ускорения электронов, амплитуде тока и длительности его импульса и одновременно обеспечение ресурса срабатываний диода ≥ 20 включений без его разгерметизации. Связано это с тем, что в сильноточных диодах с пинчеванием пучка на тонкой анодной мишени она обычно "прогорает" в месте фокуса за одно срабатывание установки. Тем не менее техническое решение этой задачи было найдено, что позволило создать нужный источник.

Одним из авторов (А. И. Герасимов) был проведен сравнительный анализ для данного применения известных генераторов высоковольтных импульсов как непосредственно для ускорения электронов, так и для зарядки от них промежуточных емкостных накопителей энергии. Рассматривались: трансформаторы Тесла, импульсный, спиральный; генераторы Аркадьева – Маркса (ГИН) [1]; индукторы с сумматором напряжения [2]; формователи импульсов ускоряющего напряжения в виде низкоимпедансных одиночных или двойных линий (ДФЛ) с жидкостной изоляцией (масло, глицерин, смеси очищенной воды с этиленгликолем или метанолом [3]), разряжаемых затем на сильноточную электронную пушку. Было определено, что с учетом имеющегося во ВНИИЭФ многолетнего успешного опыта разработки высоковольтной технологической базы и созданной с ее применением разнообразной электрофизической аппаратуры, в том числе сильноточных импульсных ускорителей с водяной и глицериновой изоляциями (например, [2–7]), оптимально для обеспечения требований и из компромисса условий использовать в качестве источника высоковольтного напряжения экранированный маслоизолированный ГИН, заряжающий ДФЛ с глицериновым диэлектриком, которая затем разряжается на сильноточный электронный диод с взрывозамессионным катодом. Исходя из этого была разработана блок-схема источника РИ (рис. 1), названного ИЛТИ (источник лабораторный, транспортабельный, импульсный). Назначение блоков понятно из подрисуночной подписи.

Электрическая схема ГИН для формирования на выходе импульсного напряжения положительной полярности приведена на рис. 2. ГИН содержит шесть каскадов умножения напряжения с одним промышленным конденсатором ИК 100-0,25 УХЛ (100 кВ; 0,25 мкФ; 1,25 кДж) в каждом из них. Компоненты каскадов размещены в стальном заземленном герметичном баке Э, являющемся обратным токопроводом сильноточного разрядного контура, экранирующем рассеяние переменных электромагнитных полей в окружающее пространство и обеспечивающем электробезопасность персонала. Бак одновременно служит силовым несущим каркасом при транспортировке ГИН, для чего он оснащен соответствующими крючьями.

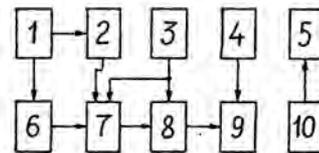


Рис. 1. Блок-схема ИЛТИ: 1 – пульт управления; 2 – генераторы пусковых импульсов; 3 – система газонаполнения разрядников; 4 – вакуумные насосы; 5 – регистрационно-измерительная аппаратура; 6 – высоковольтный выпрямитель; 7 – ГИН; 8 – ДФЛ; 9 – электронная пушка (сильноточный диод); 10 – детекторы излучения

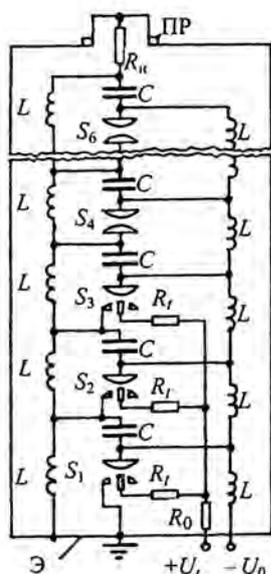


Рис. 2. Электрическая схема ГИН: C – конденсатор каскада; S_1-S_6 – газонаполненные разрядники; L – катушки индуктивности зарядно-разрядных цепей; R_i, R_0 – резисторы пусковой цепи; ПР – пояс Роговского; R_n – резистивный имитатор нагрузки; U_i, U_0 – напряжение управляющее и зарядки конденсаторов; Э – экран (бак)

Одним из важных элементов, определяющих задержку времени включения ГИН и ее стабильность при последовательных запусках, является коммутатор каскада. Во ВНИИЭФ имеется большой опыт создания и длительного использования в ГИН надежных тригатронов на напряжение до 100 кВ, наполняемых смесью N_2 и SF_6 до давления 0,9 МПа и срабатывающих с наносекундным разбросом при запасах электропрочности до 100 %. Поэтому в первых трех каскадах применены известные управляемые разрядники S_1-S_3 (например, [8–12]), а в остальных S_4-S_6 – аналогичные, но без пусковых электродов, пробивающиеся при перенапряжении зазоров между основными электродами. Для учета потерь энергии сопротивление искровых каналов разрядников оценивали по формуле Брагинского – Андреева [13]

$$R_s \approx 0,1l\rho^{1/3} (I^{2/3}t)^{-1}, \quad (1)$$

где l (м) – длина разрядного промежутка; ρ (г/см³) – плотность наполняющего разрядник газа; I (А) – средний ток в течение расчетного интервала времени t (с). Для пробоя разрядников с наносекундным разбросом их электроды должны иметь полярности потенциалов, как это указано на рис. 2. Если они будут противоположными, то при прочих равных условиях время задержки пробоя и его разброс возрастут на порядок.

Так как ГИН должен работать и при отрицательных температурах, то вместо обычно используемых герметичных жидкостных резисторов [14] в его зарядно-разрядных цепях предусмотрены катушки L из 77 витков стального провода диаметром 1,2 мм в один слой в пазах глубиной 2 мм на цилиндрическом полиэтиленовом каркасе диаметром 45 мм. К торцам каркасов прикреплены винтами дискообразные электроды. Габаритная длина катушки – 178 мм, индуктивность – 68 мкГн с учетом близко находящихся металлических деталей.

Резисторы $R_i = 300$ Ом и $R_0 = 50$ Ом для ГИН были специально отобраны из промышленных резисторов типа ТВО-6 по надежности контактов их выводов с объемно-проводящей массой и испытанные в масле на импульсное напряжение 100 кВ.

Перед монтажом в ГИН конденсаторов проверяли электропрочность каждого из них при постоянном напряжении 130 кВ между выводами в течение 1 мин. Затем их испытывали на надежность внутренних сильноточных соединений в течение 50 зарядно-разрядных циклов при импульсном токе около 50 кА. Выдержавшие эти проверки конденсаторы отбирались одинаковыми по емкости и устанавливались в ГИН. Каждый тригатрон тоже индивидуально проверяли на стенде на герметичность при давлении газа 2 МПа, а затем – на электропрочностные и пусковые характеристики.

После сборки ГИН в баке и заливки в него сухого трансформаторного масла подключали к выходу ГИН мощный резистор R_n (имитатор нагрузки) на основе водного раствора сульфата меди [15] с возможностью изменения сопротивления от 3 до 50 Ом путем замены электролита с другим удельным сопротивлением. Постепенно повышая напряжение U_0 зарядки конденсаторов от 70 до 100 кВ и изменяя величину R_n , в том числе при его закорачивании, измеряли времена за-

держек и их разброс при срабатываниях ГИН, а также его индуктивность. Для указанного применения ГИН с целью повышения надежности и ресурса конденсаторов, а также источника ИЛТИ в целом, принято рабочее U_0 в диапазоне от 85 до 95 кВ. А так как ресурс конденсаторов пропорционален E^{10} [16], где E – рабочая напряженность в их изоляции, то, например, снижение E на 10 % увеличивает ресурс уже в 2,2 раза. При $U_0 = 90$ кВ и давлении газов в разрядниках 0,7 МПа (запас 80 %) время задержки составило 112 ± 8 нс в серии из 300 запусков при амплитуде управляющего напряжения $U_i = 60$ кВ с фронтом ~ 10 нс. Измеренная по характеристикам колебательного процесса тока в контуре ГИН индуктивность равна $\sim 0,9$ мкГн. Около 50 запусков ГИН сделано при $U_0 = 100$ кВ и $R_n = 50$ Ом для проверки электропрочности элементов контура при длительности прикладываемого к R_n импульса $\sim 1,6$ мкс. Всего в период испытаний ГИН проведено 800 его запусков в разных режимах без каких-либо отрицательных последствий.

Конструкция ГИН здесь не приведена, так как она аналогична ранее описанному пятикаскадному ГИН с такими же конденсаторами, но с более индуктивными разрядниками [11].

Выбор глицерина для ДФЛ определен следующими, подходящими для такого ускорителя характеристиками:

- температура замерзания -50 °С;
- сохранение электропрочности и частотных свойств в течение нескольких лет на импульсах микросекундной длительности без какой-либо периодической обработки жидкости даже после многократных пробоев через объем [6, 7, 17, 18];
- напряженность при пробое оценивается для конкретных условий по формуле [19] для обеих полярностей электродов

$$E_b \approx 700 \left(t_e^{0,33} S^{0,1} \right)^{-1}, \text{ (кВ/см);} \quad (2)$$

здесь t_e (мкс) – интервал времени нарастания электрического поля от 0,63 до E_b ; S (см²) – площадь электрода, на котором поле изменяется в пределах от 90 до 100 % от E_b (отметим, что E_b воды в 2,33 и в 1,33 раза меньше при развитии пробоя с электрода, имеющего соответственно положительную или отрицательную полярность потенциала); в [17, 18] отмечается, что рабочая напряженность в ДФЛ была принята 200 кВ/см (в воде обычно 100–130 кВ/см); но на втором максимуме зарядного напряжения (через 1,6 мкс после начала зарядки) были случаи пробоев глицерина при 230–250 кВ/см и площади электродов $\sim 10^4$ см²;

– статическая относительная диэлектрическая проницаемость $\epsilon \approx 41,1$ при 20 °С (39,2 и 37,3, соответственно, при 30 и 40 °С), которая с ростом температуры до $T = 100$ °С уменьшается по закону [20]

$$\lg \epsilon = 1,6142 - 0,00212 (T - 20); \quad (3)$$

при снижении T увеличивается ϵ и составляет 46, 49 и 52, соответственно, при 0, -10 , -20 °С. В [17, 18] измерена для технического глицерина при 20 °С величина ϵ в зависимости от частоты f и показано, что до $f = 31$ МГц она постоянна, а затем спадает до 32 при 100 МГц; при отрицательных температурах с ростом f уменьшается ϵ , составляя, например, для $T = -10$ °С, соответственно, 44 и 29 при $f = 2$ и 5 МГц [20];

- глицерин хорошо сочетается с электродами из обычной стали и других металлов [6, 7, 17, 18];
- не горючий и безвреден при попадании на кожу;
- относительно дешевый.

Недостатками глицерина следует признать значительный тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ и сравнительно малое удельное электрическое сопротивление $\rho \sim 10^6$ Ом·см (однако отметим, что не меняющаяся в течение нескольких лет величина ρ благоприятно сказывается на постоянстве выходных характеристик ускорителей). Измеренный в [17, 18] при 20 °С $\text{tg } \delta$ техниче-

ского глицерина в диапазоне частот от 0,1 до 100 МГц имеет минимум при 3 МГц ($\operatorname{tg} \delta \approx 0,032$). В связи с такими значениями $\operatorname{tg} \delta$ и ρ , а также спадом ϵ при f свыше 30 МГц, невозможно получить длительности фронта и среза менее 10 нс при пропускании короткого импульса через линию с глицерином. Однако при разряде линии через коммутатор на нагрузку фронт импульса на ней может быть и короче, так как он определяется, в основном, изменением во времени величин импедансов коммутатора и нагрузки, а также индуктивностями участков соединения коммутатора с электродами линии и с нагрузкой. Кроме того, использование в ДФЛ глицерина ограничивает время t_0 ее зарядки допустимыми потерями энергии за это время. При обычно принятой зарядке по закону $1 - \cos \omega t$ (здесь ω – круговая частота, t – текущее время) и коммутации ДФЛ на нагрузку в максимуме напряжения оценить потери энергии W можно по соотношению [18]

$$\Delta W/W \approx 2,6 \cdot 10^{13} / (\omega \epsilon \rho). \quad (4)$$

Если допустить потерю энергии 10 % ($\Delta W = 0,1$), то при $\epsilon = 41$ и $\rho = 10^6$ Ом·см время $t_0 = \pi/\omega$ не должно быть более 0,5 мкс.

Перечисленные данные позволили определить характеристики остальных входящих в состав ИЛТИ узлов, разработать их структурные, электрические и компоновочные схемы и приступить к созданию установки.

За основу ДФЛ взята ее конструкция в ускорителе ГОНГ-1 [6], заряжаемая от воздушного ГИН до напряжения 0,7 МВ за 0,5 мкс. Диаметры наружного и центрального электродов составляли 490 и 305 мм, соответственно, длина ДФЛ – 500 мм. Она разряжалась на вакуумируемый диод с взрывозмиссионным катодом. Ток через диод достигал 70 кА; при торможении ускоренных электронов в тонкой мишени из тантала генерировалось рентгеновское излучение длительностью на полувысоте 15 нс и дозой ~ 1 Р на расстоянии 1 м от мишени.

С учетом характеристик глицерина, требований к ИЛТИ и опыта создания, исследований и применений ГОНГ-1 разработана конструкция ДФЛ, рассчитанная на зарядку ее до напряжения 1 МВ (рис. 3).

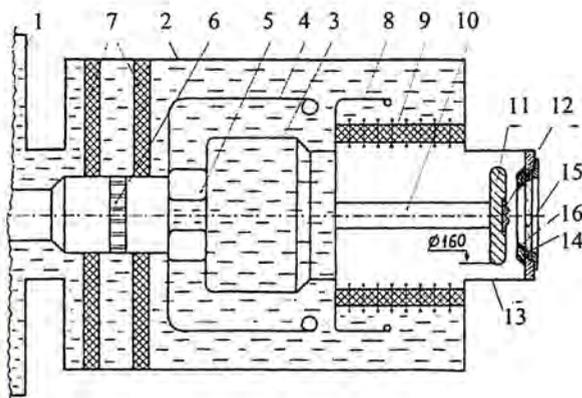


Рис. 3. Конструктивная схема ДФЛ: 1 – ГИН; 2 – корпус ДФЛ; 3 – центральный электрод ДФЛ; 4 – промежуточный электрод ДФЛ; 5 – коммутатор ДФЛ; 6 – цапговый контакт; 7 – диафрагмы; 8 – экран ускорительной трубки; 9 – секционированный изолятор ускорительной трубки; 10 – анодный шток; 11 – дисковый анододержатель; 12 – анодная вставка; 13 – металлический патрубок; 14 – графитовый катод (эмиттер); 15 – выходное окно из пластика; 16 – стальные стенки (облицовка) катода

Металлический бак 1 ГИН разъемно соединен с корпусом 2 ДФЛ, образованной этим корпусом (внутренний \varnothing 498 мм), электродами центральным 3 (внешний \varnothing 298 мм) и промежуточным 4 (внешний \varnothing 410 мм, толщина стенок электродов – 3 мм, осевая протяженность ДФЛ \sim 700 мм). Между торцовыми поверхностями электродов 3 и 4 установлен газонаполненный коммутатор 5. Для экспериментальных исследований предусмотрено размещение по окружности 180 мм трех управляемых (по методу возмущения поля с промежуточным третьим электродом) или неуправ-

ляемых двухэлектродных газонаполненных разрядников, а также одного разрядника по оси. Высокоточный вывод с ГИН соединен с электродом 4 посредством цангового контакта 6. Разъемные части контакта герметично закреплены в полиэтиленовых диафрагмах 7. Конструкция участка корпуса 2 между диафрагмами позволяет после слива масла из объема между ними разъединять ГИН и ДФЛ с изолирующими жидкостями в них. Корпус 2 из стали и электрод 4 образуют внешнюю коаксиальную линию ДФЛ с волновым сопротивлением $z_1 \approx 1,9$ Ом и электрической длиной $\tau_1 \approx 17$ нс (временем пробега электромагнитной волны по длине линии, включая пробег по части радиуса между торцами электродов), а электроды 3 и 4 – внутреннюю коаксиальную линию с сопротивлением $z_2 \approx 2,8$ Ом и электрической длиной $\tau_2 \approx \tau_1$. Электрод 4 закреплен на продолжении цангового контакта, а электрод 3 – на высоковольтном экране 8 секционированного изолятора 9 электронного диода. Торцевая часть электрода 8 является как бы продолжением электрода 3, а цилиндрическая часть этого экрана образует относительно корпуса 2 линию с сопротивлением $z_3 \approx 1,9$ Ом и электрической длиной $\tau_3 \approx 5$ нс.

На штоке 10 закреплен анододержатель 11 в виде диска с анодной вставкой 12, а в торце металлического патрубка 13 – катодное устройство в виде полого конического эмиттера 14 и выходного окна 15 из пластика. Графитовый катод 14 облицован с наружной и внутренней конических поверхностей стальными стенками 16.

Как видно из рис. 3, здесь отсутствует какая-либо катушка индуктивности, обычно соединяющая электрод 3 с корпусом 2 и служащая для протекания тока при зарядке от ГИН емкости внутренней линии между электродами 3 и 4. Ниже будет показано, что роль такого участка цепи выполняет сопротивление R_c предимпульсной плазмы в диоде, возникающей во время зарядки ДФЛ.

Изолятор 9 диода имеет общую длину 280 мм и внешний диаметр 280 мм. Он собран из 22 дифлоновых колец, разделенных тонкими кольцевыми электродами из стали, в которых выполнены пазы для резиновых уплотнительных прокладок. Вся сборка сжата расположенными снаружи капролоновыми стержнями с резьбой на концах. Экран 8 служит для выравнивания электрического поля по длине изолятора.

В сильноточных диодах с пинчеванием пучка электронов тонкие аноды-мишени из тяжелого вещества имеют малый срок службы из-за нагрева их пучком и эрозии под воздействием образующейся плазмы. Обычно после одного срабатывания ускорителя мишень "прогорает" и заменяется на новую; иногда применяются не очень практичные устройства для перемещения мишени и, таким образом, замены ее только через 5–10 включений ускорителя. В ИЛТИ требуемый срок службы диода без разгерметизации его для замены или профилактики элементов решен по результатам ранее проведенных исследований Н. И. Завадой с коллегами [21]; вместо диода (ДП) с прямопроточными электронами тонким анодом-мишенью применен "обратный" диод (ОД), т. е. используется массивный анод из тяжелого вещества, находящийся под импульсным положительным потенциалом, а обратно выходящее из анода РИ выводится через тонкое окно из пластика в сторону катода, имеющего потенциал земли. Некоторым недостатком ОД является смягчение спектра РИ и удаление анода от внешней поверхности выводного окна, что снижает непосредственно за ней величину дозы. Расчеты характеристик РИ показали следующее. Для ДП с толстой мишенью и для ОД с массивным анодом средние энергии квантов спектра аппроксимируются выражениями, соответственно, $G_n \approx 0,36Y^{0,55}$ и $G_0 \approx 0,11Y^{0,65}$, где Y (МэВ) – энергия ускоренного электрона. Например, для $Y = 1$ МэВ имеем $G_n \approx 300$ кэВ и $G_0 \approx 120$ кэВ. КПД преобразования кинетической энергии Y электрона в энергетический выход в спектральном диапазоне 10–100 кэВ составляет для ДП и ОД 0,4 % и 0,6 %, соответственно. Энергосодержание этого участка спектра от всей энергии квантов равно 20 % и 55 % для ДП и ОД при $Y = 0,5$ МэВ.

При проведении дозиметрических измерений следует учитывать возможное влияние прошедших через тонкое окно обратно рассеянных (ОРЭ) от анода падающих на него ускоренных

электронов. При нормальном падении электронов на мишень из Та толщиной 1 мм относительное количество ОРЭ монотонно падает с ростом Y ; для $Y = 0,5$ и 1 МэВ оно составляет 44 и 40 %, соответственно. Сходным образом меняется и энергия ОРЭ; для указанных Y она равна 73 и 63 %. В рамках оговоренных условий вынос общей энергии ОРЭ может достигать 30 %.

Показанные на рис. 3 детали катода и анода для образования в их окрестности плазмы при приложении напряжения предимпульса и последующего формирования и ускорения пучка электронов разработаны с учетом результатов экспериментальных исследований, изложенных в [4, с. 97; 22]. Формы и размеры деталей подбирались экспериментально по опыту подобных работ на ускорителе ГОНГ-1 [6, 22].

По завершении испытаний ГИН, разработки конструкций ДФЛ и сильноточного диода была составлена эквивалентная электрическая схема главных узлов ИЛТИ (рис. 4). ДФЛ в период ее зарядки от ГИН представлена двумя сосредоточенными емкостями C_H и C_B образующих ее линий, так как время пробега электромагнитной волны по каждой из них $\tau \approx 17$ нс короче времени зарядки ДФЛ в > 10 раз.

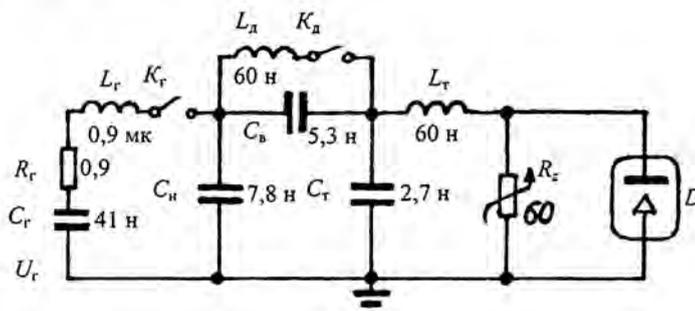


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема цепи ГИН – ДФЛ – диод: C_r, L_r, R_r – выходная емкость ГИН, его индуктивность и активное сопротивление контура; U_r – напряжение на выходе ГИН, равное nU_0 (n – число каскадов); K_r – ключ емкости C_r ; C_H, C_B – емкости наружной и внутренней линий ДФЛ; L_d – индуктивность коммутатора K_d ДФЛ; C_T – емкость экрана 8 (см. рис. 3); L_T – индуктивность штока 10; D – электронный диод; R_z – активное сопротивление предимпульсной плазмы в диоде

После замыкания цепи ключом K_r заряженная первоначально до U_r емкость C_r начинает разряжаться через R_r и L_r на емкость C_H и последовательно соединенные емкости C_B и C_T . В связи с тем, что C_T в 2 раза меньше C_B , 66 % этого напряжения прикладывается к C_T . Напряжение с C_T одновременно передается через L_T к анодному диску 11 (см. рис. 3), в результате чего между этим диском и находящимися под потенциалом земли близко расположенными поверхностями патрубка 13, а также между катодом 14 и диском 11 (анодом) диода начинают развиваться предзарядные явления. Общее сопротивление R_z образующейся разреженной предимпульсной плазмы быстро уменьшается. Ранее экспериментально было показано [6, 22], что при данной конфигурации анодных и катодных деталей сопротивление становится близким к ~ 60 Ом за время, составляющее $\sim 0,1$ от длительности зарядки ДФЛ до амплитудного значения. Это позволяет принять, что за это время емкость C_T существенно разрядится и далее ток зарядки емкости C_B потечет через L_T и R_z (постоянная времени $L_T/R_z \approx 1$ нс). Поэтому можно приближенно считать, что напряжение на параллельно соединенных емкостях C_H и C_B растет по закону (при допущении $R_r = 0$) [23]

$$U_H \approx U_r C_r (C_r + C_H + C_B)^{-1} (1 - \cos \omega t), \quad (5)$$

где $\omega = \{(C_r + C_H + C_B)/[L_r C_r (C_H + C_B)]\}^{0.5}$. Подставив в (5) числовые значения, получим, что в контуре амплитуда напряжения за половину периода электрических колебаний

$$T/2 = \pi [L_r C_r (C_H + C_B) / (C_r + C_H + C_B)^{-1}]^{0.5} = 280 \text{ нс} \quad (6)$$

достигнет значения $U_n \approx 1,52U_r$. Учет потерь энергии на сопротивлении искровых каналов в разрядниках ГИН (1) и за счет тангенса угла потерь в диэлектрике конденсаторов (для касторового масла $\text{tg } \delta \approx 0,12$ [24]), некоторого уменьшения величины диэлектрической проницаемости масла на данной частоте $f = 1/T \approx 18$ МГц, а также потерь из-за утечки тока через глицерин во время зарядки ДФЛ (4), показывает, что в сумме потери составят $\sim 15\%$. Поэтому реально амплитуда U_n тоже будет ниже на $\sim 15\%$, т. е. $U_n \approx 1,3U_r$.

Пусть в момент амплитудного значения U_n на ДФЛ происходит идеальный одновременный пробой разрядников K_d (импеданс мгновенно уменьшается до нуля) и начинает распространяться к диоду по внутренней линии, имеющей сопротивление $z_2 \approx 2,8$ Ом, волна ее разрядки. Через время $\tau \approx 17$ нс она достигнет разомкнутого конца этой линии и отразится обратно с изменением полярностей потенциалов на электродах. На выходе ДФЛ создается импульсное напряжение с амплитудой $2U_n = 2,6U_r$, которое распределится между внутренним сопротивлением ДФЛ $z_1 + z_2 \approx 4,7$ Ом и сопротивлением $z_3 \approx 1,9$ Ом. На z_3 выделится на время $2\tau_3 \approx 10$ нс напряжение $\sim 0,75U_r$, которое через шток 10 (см. рис. 3) передастся к ускоряющему зазору между анодом и катодом. Это напряжение значительно выше напряжения предимпульса. Так как на выходе ДФЛ импульс имеет длительность $2\tau_1 \approx 34$ нс, то по прошествии от его начала указанного времени $2\tau_3 \approx 10$ нс напряжение на экране 8 начнет дополнительно повышаться с постоянной времени $t_3 = (z_1 + z_2)C_T \approx 13$ нс, ибо C_T оказывается как бы подключенной к генератору с внутренним сопротивлением 4,7 Ом и напряжением $2U_n \approx 2,6U_r$. Поэтому напряжение U_T на C_T , и соответственно на штоке 10, могло бы максимально достигнуть значения $2,6U_r$. Однако с ростом U_T начинает увеличиваться плотность j тока взрывной эмиссии с микроострий на торце графитового катода, и соответственно, общий ток пучка электронов на анод, так как j пропорциональна $\sim U_T^2$ [25]. Форма и геометрические размеры катода и анода экспериментально подобраны так, чтобы импеданс промежутка обеспечивал амплитуду тока ~ 80 кА. Этот ток в дополнение к току утечки через предимпульсную плазму создает падение потенциалов на последовательно соединенных импедансах элементов разрядного контура и по оценкам снижает в ~ 2 раза напряжение U_d на диодном промежутке. При такой величине тока и наличии предимпульсной плазмы (плазменнонаполненный режим) пучок будет самопинчеваться, достигая на поверхности анода диаметра ~ 5 мм и создавая требуемую дозу РИ. При предполагаемом напряжении зарядки конденсаторов в ГИН $U_0 = 95$ кВ имеем $U_r = 570$ кВ и максимальное значение $U_T = 1,3U_r \approx 740$ кВ. Заложенный запас 5 кВ возможности повышения U_0 до номинального напряжения 100 кВ позволял при необходимости корректировать в экспериментах рабочее напряжение и иметь U_d до 780 кВ.

Идеализированное представление переходного процесса реально сложнее, так как выше не учтены, например, активная и реактивная составляющие искр в K_d и их изменение во времени, влияние индуктивности штока L_T и т. д. Они будут, в первую очередь, удлинять фронт и срез импульса напряжения на диодном промежутке. Но в целом качественно рассмотренный электрический процесс позволяет уяснить особенности работы установки и характеристики импульсных напряжений на компонентах зарядно-разрядного контура.

Окончательно напряжение U_0 , количество и тип разрядников в составе K_d планировалось определить в процессе проведения пуско-наладочных работ на ИЛТИ и выборе режима его функционирования, обеспечивающего выполнение всех указанных выше требований к источнику РИ. При этом существенной являлась готовность узлов ИЛТИ к работе в указанных условиях при минимальном и простом их обслуживании обученным персоналом.

Для проведения испытаний объем ДФЛ заполнялся глицерином (марки ЧДА или дистиллированным, ГОСТ 5.2043-73), подогретым до ~ 70 °С электронагревателями с целью снижения вязкости жидкости и удаления из нее пузырьков. Кроме того, в объеме ДФЛ создавалось разрежение

воздуха до давления 300 мм рт. ст. Разрядники в ГИН заполнялись смесью 60 % N_2 и 40 % SF_6 до давления 0,6 МПа. Разрядники K_d наполнялись азотом до давления 0,3–0,5 МПа.

Расстояние между торцом катода и обращенной к нему поверхностью диска 11 составляло 15 мм. Первоначально вставка 12 из тантала была плоской, а катод из графита был выполнен в виде усеченного полого конуса с внешним и внутренним диаметрами 50 и 35 мм со стороны вершины конуса и углом при основании 13° , окно 15 – из поликарбоната.

Откачка газов из объема ускорительной трубки до давления $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. производилась в течение $\sim 1,5$ ч обычными пароструйным и механическим вакуумными насосами. Конденсаторы в ГИН заряжались от выпрямителя на основе повышающего трансформатора 220 В/130 кВ от рентгеновского аппарата, подключенного к сети через тиристорный регулятор РОТ 63-380-50 УХЛ4 и оснащенного на выходе повышающей обмотки диодами СДЛ-0,4-1500 (СДЛК 0,4/150). Генераторами пусковых импульсов для разрядников служили два типовых блочных импульсных наносекундных генератора БИНГ-5 (10 кВ, 120 нс, фронт 5 нс, 3 канала) и БИНГ-4 (56 кВ, 40 нс, фронт 8 нс, 4 канала) [26]. Первый генератор срабатывает от стартового импульса с амплитудой 300 В или при нажатии кнопки на панели прибора. Он запускает БИНГ-4, по одному кабелю с которого подавалось управляющее напряжение на тригатроны в трех начальных каскадах ГИН, а по второму – через линию задержки на разрядники K_d . Этот импульс передавался к ним через отрезок кабеля, свернутый в катушку индуктивности, размещенную в масле у высоковольтного вывода ГИН, и проложенного к ним через цанговый контакт б (см. рис. 3); эта индуктивность на рис. 3 не показана, так как после начальных включений ИЛТИ она была изъята по ненадобности (см. ниже). Остальные каналы с обоих генераторов могли служить для синхронизации включения другого используемого в экспериментах оборудования. Форма и амплитуда напряжения U_T измерялись посредством емкостного делителя, встроенного в корпус 2 (см. рис. 3) напротив экрана 8, и осциллографа СРГ-5 или другого типа. Напряжение U_d между анодом 12 и катодом 14 определялось из осциллограмм путем вычета падения напряжения на индуктивности штока 10. Параметры тока пучка измерялись с помощью экранированного гальванически развязанного пояса Роговского [27], размещенного в вакууме по внутреннему периметру патрубка 13 у места его стыка с фланцем днища, за вычетом тока предимпульсной плазмы. Форма и длительность РИ регистрировались детекторами СДФ-7, СКД1-02, СКД1-02 (разрешение не хуже 3,6 нс) и разными осциллографами, в том числе, с цифровой записью сигналов. Экспозиционная доза излучения РИ измерялась термолюминесцентными детекторами на основе стекол ИС-7 по методу ИКС.

Вид ДФЛ, соединенной с ГИН, показан на рис. 5.

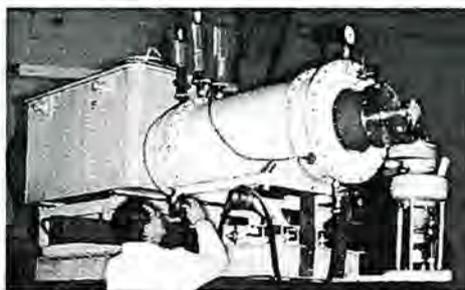


Рис. 5. ДФЛ, состыкованная с ГИН ИЛТИ, в рабочем состоянии на подставке. На переднем плане справа пароструйный вакуумный насос, присоединенный к патрубку ускорительной трубки

Испытания ИЛТИ были начаты при $U_0 = 80$ кВ. В первых же включениях подтвердилось, что формы и размеры диска 11, патрубка 13 и катода 14 (см. рис. 3) обеспечивают зарядку от ГИН внутренней линии ДФЛ до амплитудного напряжения без указанной выше катушки индуктивности, т. е. за счет протекания тока через емкость экрана 8 и сопротивление R_z предимпульсной плазмы. Прикладываемое напряжение предимпульса возбуждает с микроострий электродов автоэлектронную и взрывную эмиссию с выделением с поверхностей электродов адсорбированных

газов и образованием здесь разреженной плазмы, а также за счет ионизации остаточного газа. Судя по сигналу с пояса Роговского, амплитуда тока через плазму достигает нескольких килоампер. Измеренное время зарядки ДФЛ от ГИН до амплитудного значения совпало с рассчитанным 280 нс. Было выявлено, что в связи с таким коротким временем зарядки все три разрядника K_d срабатывают синхронно вблизи амплитуды напряжения U_n при определенном давлении газа без подачи управляющего импульса, потому эти коммутаторы были заменены на двухэлектродные, а пусковая кабельная катушка была демонтирована. Затем для упрощения обслуживания ИЛТИ и эти три разрядника были заменены одним, расположенным по оси системы.

Установлено, что внешние и внутренние кромки торца графитового катода сильно эродируют и разрушаются за 10–20 включений ИЛТИ. "Облицовка" поверхностей конуса стальными стенками с внешней и внутренней сторон, как это изображено на рис. 3, повысило ресурс работы катода как минимум до 200 запусков источника.

Пучок электронов пинчуется на аноде, металл здесь сильно нагревается, что приводит к эрозии поверхности по площади фокуса и выбросу с нее разогретых механических частичек. При их ударах по выходному окну 15 толщиной 6 мм из поликарбоната в нем появлялись трещины и прогар за 1–3 включения установки. Такое же окно из полиэтилена выдерживало до 10 последовательных воздействий. Так как в вакууме пары и частички металла летят, в основном, перпендикулярно поверхности анода, то решено было сделать ее профилированной. Для этого анодная вставка из порошкового сплава ВЖ 7-3 (W; 7 % Ni; 3 % Fe) вытачивалась с закругленным кольцевым выступом вокруг центра (см. рис. 3). С таким анодом окна из полиэтилена стали выдерживать ≥ 200 запусков ИЛТИ.

Основное же ограничение на количество включений ИЛТИ со стабильными характеристиками РИ наложил эрозия анода. В процессе последовательных срабатываний установки образуется в центре вставки 12 выемка, которая углубляется от импульса к импульсу. Через ~ 40 запусков эта выемка становится настолько глубокой, что РИ как бы коллимируется ее стенками и оно выходит в узком угле. Поэтому определено, что генерирование РИ с требуемыми параметрами реализуется в течение 25 последовательных включений ИЛТИ, после чего необходимо разгерметизировать диод и заменить вставку 12 на новую, хотя работоспособность установки сохраняется. При каждой замене вставки следует зачистить надфилем торцовую поверхность катода, на которой осаждаются продукты эрозии анода.

После комплекса изложенных по результатам испытаний изменений элементов начали постепенно увеличивать напряжение зарядки U_0 , контролируя поведение и состояние всех критических деталей и регистрируя рост импульсной дозы до гарантированного получения указанной выше ее величины. Получено, что при $U_0 = 95$ кВ в серии из 25 последовательных импульсов доза РИ на оси системы на 1 м от анода составляет $1,3 \pm 0,2$ Р. На расстоянии 10 см от анода – доза в этой серии около 200 Р. Камера-обскуры показала, что пучок электронов пинчуется до диаметра ~ 5 мм на аноде; при этом слабое афокальное излучение фиксируется с площади диаметром ~ 15 мм. Время задержки генерирования РИ относительно пускового импульса установки с генератора БИНГ-5 не превышает 50 нс. Определенные выше сроки службы анода и выходного окна сохраняются.

Этот режим работы ИЛТИ был закреплен как типовой и подвергся дальнейшим экспериментальным исследованиям. На рис. 6 показаны формы импульсов, зарегистрированные в одном цикле срабатывания ускорителя.

Был определен спектр РИ с использованием метода поглощающих фильтров. Рабочими и вспомогательными детекторами служили дозиметры методики ИКС-А. Энергетические зависимости чувствительности (отношение выделившейся в чувствительном объеме энергии к энергии регистрируемого излучения) рассчитан методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА [28].

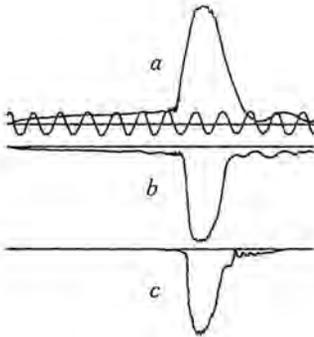


Рис. 6. Формы импульсов напряжения в типовом режиме работы ИЛТИ: *a* – напряжение $U_1 \approx 930$ кВ на экране *8* (см. рис. 3); *b* – ток $I \approx 80$ кА между диском *11* и торцовым фланцем патрубка *13* вместе с катодом *14*; *c* – форма импульса РИ. Частота меток – 25 МГц

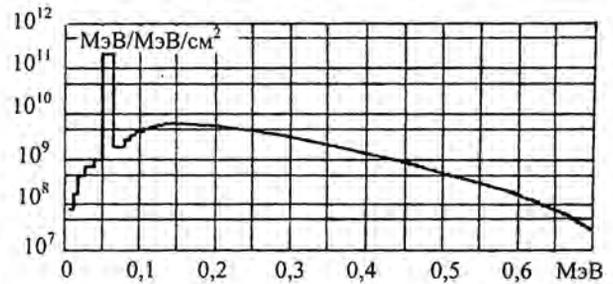


Рис. 7. Спектр РИ

Восстановление спектра по экспериментальной фильтрационной кривой проводилось методом Голда [29] с использованием рассчитанных спектральных характеристик дозиметров и сечений взаимодействия гамма-квантов [30]. Из-за обратного рассеяния РИ из диода искомым спектром при обработке представлялся суммой непрерывной компоненты, равной нулю на верхней границе спектра, и дельта-функцией. На рис. 7 приведен полученный спектр. Отметим, что с учетом поправки измерения этот спектр является средним по площади 20×30 см² на расстоянии 1 м от анода. Средняя энергия непрерывной компоненты – 160 кэВ.

Для использований во ВНИИЭФ были изготовлены два ускорителя ИЛТИ, удовлетворяющие всем предъявленным требованиям. С 1998 г. до настоящего времени оба они применяются для радиационных исследований в составе установок облучательного комплекса ПУЛЬСАР [31], а также автономно и в синхронном режиме включения, находясь в постоянной готовности к штатной работе и требуя только $\sim 1,5$ ч для вакуумирования диода. За прошедшее время производилось ежегодно в среднем по 130 рабочих запусков каждого из них. В течение указанного срока заменялись только анодные вставки через каждые 20–30 срабатываний и по одному разу – выходные полиэтиленовые окна. Глицерин в ДФЛ не заменялся. ГИН ревизии не требовали. Ускорители показали стабильность функционирования и простоту обслуживания, находясь в постоянной готовности к работе.

Если бы ИЛТИ предполагалось использовать только при положительной температуре окружающего воздуха, то в ДФЛ вместо глицерина можно было бы применить деионизованную и дегазированную воду с учетом изменения электропрочности такой изоляции [3]. При указанных размерах электродов ДФЛ это увеличило бы в ~ 2 раза длительность формируемого импульса тока и уменьшило бы в 1,4 раза ее выходной импеданс. Но потребовались бы возможная доработка и исследование диода, замена электродов ДФЛ на электроды из нержавеющей стали, увеличение емкости конденсаторов в каскадах ГИН, а также соответствующее оборудование для водоподготовки. Возросли бы трудоемкость обслуживания установки и снизилась бы ее универсальность.

Авторы благодарны А. С. Федоткину за участие в разработке установки, Н. В. Камышову – за монтаж и обслуживание ускорителей, С. А. Лазареву – за измерение характеристик РИ.

Список литературы

1. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. Новосибирск: Наука, 1987. С. 5.
2. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Гордеев В. С. Безжелезные линейные индукционные ускорители электронов – мощные генераторы коротких импульсов тормозного излучения // Высокие плотности энергии / Под ред. В. Н. Мохова, Р. Ф. Трунина, В. М. Горбачева и др. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997. С. 107–133.
3. Герасимов А. И. Вода как изоляция в импульсных устройствах (обзор) // ПТЭ. 2005. № 2. С. 9–38.
4. Физика и техника импульсных источников ионизирующих излучений для исследования быстропротекающих процессов / Под ред. Н. Г. Макеева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1996.
5. Герасимов А. И., Гордеев В. С., Кульгавчук В. В., Лазарев С. А. Генератор с изменяемой от 10 до 80 нс длительностью рентгеновского излучения с энергией до 400 кэВ и дозой до 70 Гр // ПТЭ. 2000. № 4. С. 89–94.
6. Гридасов А. П., Зеленский К. Ф., Камышов Н. В. и др. Сильноточный генератор наносекундных импульсов электронов и тормозного излучения // ПТЭ. 1977. № 1. С. 184–186.
7. Зеленский К. Ф., Трошкин И. А., Цукерман В. А., Завада Н. И. Сильноточный источник коротких импульсов тормозного излучения ОРИОН // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. Вып. 4. С. 239–241.
8. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Зенков Д. И. и др. Надежный точно синхронизируемый разрядник на 100 кВ // ПТЭ. 1987. № 2. С. 94–97.
9. Герасимов А. И., Федоткин А. С. Надежный газонаполненный тригатрон на 100 кВ и коммутируемую энергию до 10 кДж // ПТЭ. 1997. № 2. С. 58–63.
10. Босамыкин В. С., Герасимов А. И., Павловский А. И. и др. Система из 72 генераторов Аркадьева-Маркса для зарядки до 500 кВ радиальных линий ускорителя ЛИУ-30 // ПТЭ. 1997. № 2. С. 5–9.
11. Герасимов А. И., Федоткин А. С., Зенков Д. И., Назаренко С. Т. Надежный экранированный генератор Аркадьева – Маркса на 500 кВ и 6,25 кДж со стабильным временем задержки срабатывания // ПТЭ. 1998. № 1. С. 96–101.
12. Герасимов А. И., Гордеев В. С., Кульгавчук В. В. и др. Экранированный генератор импульсного напряжения 800 кВ и энергии 32 кДж // ПТЭ. 2005. № 6. С. 21–27.
13. Андреев С. И., Орлов Б. И. К теории искрового разряда // ЖТФ. 1965. Т. 35, № 8. С. 1411–1418.
14. Герасимов А. И., Федоткин А. С., Кульгавчук В. В. Малогабаритные высоковольтные жидкостные резисторы // ПТЭ. 1994. № 2. С. 78–85.
15. Герасимов А. И. Водно-растворные высоковольтные резисторы. Разработка, исследования, применения (обзор) // ПТЭ. 2006. № 1. С. 5–32.
16. Ренне В. Т., Багалеи Ю. В., Фридберг И. Д. Расчет и конструирование конденсаторов. Киев: Техника, 1966.

17. Казанский Л. Н., Яблоков Б. Н. Мощный наносекундный генератор // Труды 2-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. М.: Наука, 1972. Т. 1. С. 98–100.
18. Казанский Л. Н., Коломенский А. А., Месхи Г. О., Яблоков Б. Н. Сильноточный электронный ускоритель "Импульс" // Атомная энергия. 1977. Т. 42. Вып. 2. С. 113–119.
19. Martin G. C. Nanosecond Pulse Techniques, Report SSWA/ G.C.M./ 704/ 49, Apr. 1970.
20. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. Справочник. М.: Изд. стандартов, 1972.
21. Бонюшкин Е. К., Завада Н. И., Новиков С. А., Учаев А. Я. Кинетика динамического разрушения металлов в режиме импульсного объемного разогрева. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1998. С. 56–83.
22. Цукерман В. А., Трошкин И. А., Зеленский К. Ф., Белкин Н. В. Использование предимпульсных разрядов в диодах сильноточных ускорителей с двойной формирующей линией // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5, № 3. С. 169–172.
23. Кучинский Г. С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. Ленинград: Энергия. 1973.
24. Месяц Г. А. Импульсная энергетика и электроника. М.: Наука, 2004.
25. Kudasov B. G., Pavlov S. S., Tananakin V. A. et al. Module Pulse Nanosecond Generators (BING) for Universal High-Voltage Synchronization Systems // 11th IEEE Internat. Pulsed Power Conf., Baltimore, Maryland, June 29–July 2, 1997; Springfield, VA, NTIS. 1997. Vol. 2. P. 1572–1574.
26. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса гамма-излучения, электронов и позитронов // ВАНТ. Серия: Математическое моделирование физических процессов. 1993. № 1. С. 3–6.
27. Gold R. Argonne National Laboratory Report ANL-6984. 1964.
28. Сторм Э., Израэль Х. Сечения взаимодействия гамма-квантов (для энергий 0,001–100 МэВ и элементов с 1 по 100). Справочник. М.: Атомиздат, 1973 (Storm E., Israel H. Photon Cross Sections from 0,001 to 100 MeV for Elements 1 through 100. New Mexico: Los Alamos Scie. Lab. 1967)
29. Пунин В. Т. Комплексы РФЯЦ-ВНИИЭФ на базе мощных линейных ускорителей электронов и импульсных ядерных реакторов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2003. № 1 (43). С. 13–17.

ILTI: The Transportable Source of Powerful Pulsed X-ray Radiation

A. I. Gerasimov, K. F. Zelensky, V. V. Kul'gavchuk, I. A. Troshkin

Being presented are the concept and the characteristics of pulsed (~ 50 ns) X-ray radiation generator with ~ 700 keV limiting energy of quanta and ~ 1 P dose rate at 1 m distance from the target. The generator has the modular demountable structure and is assigned for on-line check of the response of the object under study in its location for the radiation effects at specific time points, as well as for radiographic control of the object fragments' position behind the opaque shield.