УДК 621.386

ПЕРЕНОСНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ АППАРАТЫ СЕРИЙ «САРМА» И «АРГУМЕНТ» ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССОВ

С.И. Герасимов Г.А.Полиенко Е.С. Хорошайло

Саров 2013

Реферат

Ключевые слова: переносный импульсный рентгеновский аппарат, газовая изоляция, экспозиционная доза рентгеновского излучения, рентгеновская трубка, быстропротекающие процессы, рентгенографирование, рентгенорегистрация, рентгенограмма.

Импульсное рентгенографирование один из основных способов исследования быстропротекающих процессов. Методы импульсного рентгенографирования получили широкое применение в экспериментальной баллистике, при изучении явлений взрыва и распространении ударных волн в различных средах. Разработан широкий спектр импульсных рентгеновских аппаратов. Аппарат «Сарма-150» позволяет получать теневые картины исследуемых объектов в воздушной среде на расстоянии до 1 м. Для проведения двухплоскостного стереорентгенографирования исследуемых объектов в воздушной среде на расстоянии до 1,2 м разработан рентгеновский аппарат «Аргумент-200К» с двумя выносными кабельными головками рентгеновских трубок.

Метод импульсного рентгенографирования широко применяется в экспериментальных террадинамических исследованиях. Эти исследования заключаются в изучении физических процессов внедрения моделей проникателей в различные виды естественных грунтовых (пески, глины, доломиты, известняки и т.д.) и искусственных (бетоны различных марок) преград.

На примерах переносных импульсных рентгеновских аппаратов серии «Сарма» и «Аргумент», анализируются возможности их использования для практических задач, решаемых на многоцелевых испытательных комплексах.

Содержание

Введение……

Рентгеновский аппарат «Сарма-150»……..

2 Рентгеновские аппараты серии «Аргумент» ……

2.1 Рентгеновские аппараты «Аргумент-200» и «Аргумент-200К»……..

2.2 Рентгеновские аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент» ……...

3 Область применения переносных импульсных рентгеновских аппаратов ……..

4 Схема рентгенорегистрации на испытательном комплексе ……..…….

5 Результаты применения переносных импульсных рентгеновских аппаратов ……

5.1 Рентгенорегистрация в воздушной среде ……..

5.1.1 Аэробаллистические испытания ……5

5.1.2 Аэродинамические испытания ……....

5.1.3 Фрагменты высокоскоростных соударений ……...

5.2 Рентгенорегистрация в плотных средах ……....

5.2.1 Террадинамические испытания……....

6 Перспективы применения рентгеновских аппаратов для исследования
быстропротекающих процессов ююююююююююююююююююююююю ……....

Литература……

Введение

Для решения широкого спектра научно-технических задач на протяжении более пятидесяти лет используется импульсная рентгенотехника. Первые импульсные рентгеновские установки, позволившие получить рентгенограммы различных движущихся объектов, в нашей стране были созданы под руководством В.А.Цукермана, который являлся основоположником отечественной импульсной рентгенотехники [1,2]. По мере совершенствования, расширялась и область применения импульсной рентгенотехники. В конце 50-х годов выделилось направление по созданию переносных импульсных рентгеновских аппаратов (ПИРА). В 1958 - 1962 г.г. И.А.Трошкиным и К.Ф.Зеленским, под руководством В.А.Цукермана, был разработан и в 1965г. внедрен в промышленность первый ПИРА, получивший название ИРА [3,4], с трансформаторным источником высокого напряжения и двухэлектродной импульсной рентгеновской трубкой.

На протяжении нескольких десятилетий руководителем направления по созданию ПИРА являлся Н.В.Белкин [5]. Большой вклад в разработку ПИРА внесли Э.А.Авилов, В.В.Боголюбов, Э.-Г.В.Александрович, Л.М.Худякова. Отечественной промышленностью был освоен серийный выпуск ряда аппаратов (аппараты серий ИРА, РИНА, МИРА, ДИНА, КАВКАЗ) и их основных элементов (импульсных рентгеновских трубок, высоковольтных разрядников-обострителей), созданных в нашем институте [6,7].

ПИРА с успехом применяются для неразрушающего контроля материалов, экспресс-рентгенографии и медицинской диагностики в нестационарных условиях, изучения радиационной стойкости материалов, рентгеноструктурного анализа, рентгеновской локации. Существуют реальные перспективы использования ПИРА для рентгеновской связи.

Основная область применения ПИРА - это исследования быстропротекающих процессов (БПП). Методы импульсного рентгенографирования получили широкое применение в экспериментальной баллистике, при изучении явлений взрыва и распространении ударных волн в различных средах.

Существенным достоинством представленных ниже ПИРА является использование в них в качестве основного диэлектрика газовой смеси вместо масла. Традиционно в качестве основного диэлектрика в высоковольтных блоках ПИРА используется минеральное трансформаторное масло. К достоинствам трансформаторного масла можно отнести высокую электрическую прочность при достаточно высоком значении диэлектрической проницаемости, общедоступность, невысокую стоимость. Другие распространенные жидкие диэлектрики, используемые в высоковольтной импульсной технике, такие как очищенная вода, глицерин, этиленгликоль, в силу специфичности своих свойств, не нашли применения в ПИРА. Газообразные диэлектрики также

широко используются в высоковольтной импульсной технике. Но в нашей стране они в основном применяются для наполнения высоковольтных разрядников-обострителей и коммутаторов [11].

На протяжении более тридцати лет в Сарове разрабатываются ПИРА, в которых в качестве основного диэлектрика высоковольтного блока используется смесь газов под давлением. Макеты первых ПИРА с газовой изоляцией [12-14] были созданы в начале 70-х годов Н.В.Белкиным и В.И.Колесовым.

Следует отметить, что работы по созданию рентгеновских аппаратов с газовой изоляцией проводят все ведущие западные производители, специализирующиеся в этой области. Импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией для исследования БПП выпускают фирмы Hewlett-Packard, Scanditronix, Physics Division и ряд других фирм [6]. Все эти аппараты созданы на основе генератора Аркадьева-Маркса (ГИН). Фирма Yxlon Internanional, ведущий в мире производитель статических рентгеновских аппаратов для промышленной дефектоскопии, также использует газ в качестве диэлектрика в высоковольтных блоках.

В большинстве современных рентгеновских аппаратов с газовой изоляцией применяются сжатый воздух или смесь N_2 и SF_6 под давлением [6,15].

Главным достоинством использования газов в качестве основного диэлектрика в высоковольтных блоках является возможность отказа от отпаянного разрядника-обострителя и замена его на разрядный промежуток, расположенный непосредственно в среде газового изолятора [12]. Разрядник-обостритель достаточно дорогой и сложный в изготовлении элемент высоковольтного блока. В ряде случаев, например, когда необходима высокая частота повторения импульсов (свыше 50-100Гц), обойтись без разрядника, наполненного H_2, невозможно, так как смеси на основе N_2 и SF_6 имеют большое время восстановления электрической прочности [16]. Но при работе в однократном режиме и при невысокой частоте повторения импульсов (до 30-40Гц) целесообразно отказаться от разрядника в пользу разрядного промежутка. Кроме того, размеры разрядника можно считать приемлемыми при разработке аппаратов с рабочим напряжением до 200-250 кВ. При более высоких рабочих напряжениях разрядники-обострители имеют слишком большие массу и габариты, что ограничивает возможность создания компактных приборов.

Применение газовой изоляции в высоковольтных блоках позволяет создавать ПИРА, имеющие существенно меньшие массу и габариты, чем их аналоги с масляной изоляцией. Это позволяет упростить использование приборов и расширить область их применения.

В данном пособии приведены принципиальные схемы и основные параметры ПИРА серий «Сарма» и «Аргумент», описана их конструкция, а так же представлен ряд примеров практического применения таких приборов.

1 Рентгеновский аппарат «Сарма-150»

Для проведения рентгенографирования различных быстродвижущихся объектов непосредственно в воздушной среде был разработан ПИРА «Сарма-150».

Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока аппарата «Сарма-150» представлена на рисунке 1.1. Первичный конденсатор С1, номиналом 0,03мкФ, заряжается от пульта управления до напряжения 9,8 кВ и находится в заряженном состоянии до подачи поджигающего импульса от импульсного трансформатора Тр.2. Конденсатор С4 заряжается до рабочего напряжения 300 В. После подачи в нужный момент на тиристор VD1 запускающего импульса, он открывается и конденсатор С1 разряжается на первичную обмотку трансформатора Тр.2. Во вторичной обмотке трансформатора Тр.2 возникает короткий импульс напряжения амплитудой 5 кВ, который подается на управляющий электрод разрядника FV1. Первичный разрядник срабатывает и конденсатор С1 разряжается на первичную обмотку импульсного трансформатора Тр.1. Возникающий во вторичной обмотке импульс напряжения заряжает емкость С2, которая, в свою очередь, после пробоя высоковольтного разрядника-обострителя FV2, разряжается на анод рентгеновской трубки Р.Т.

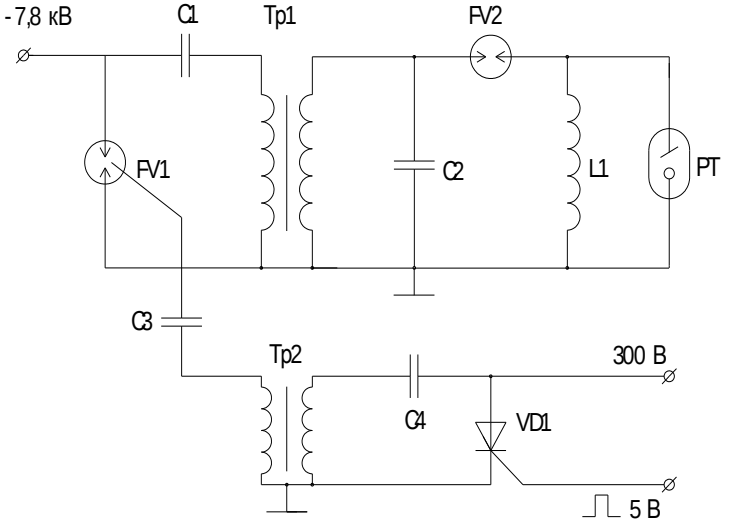


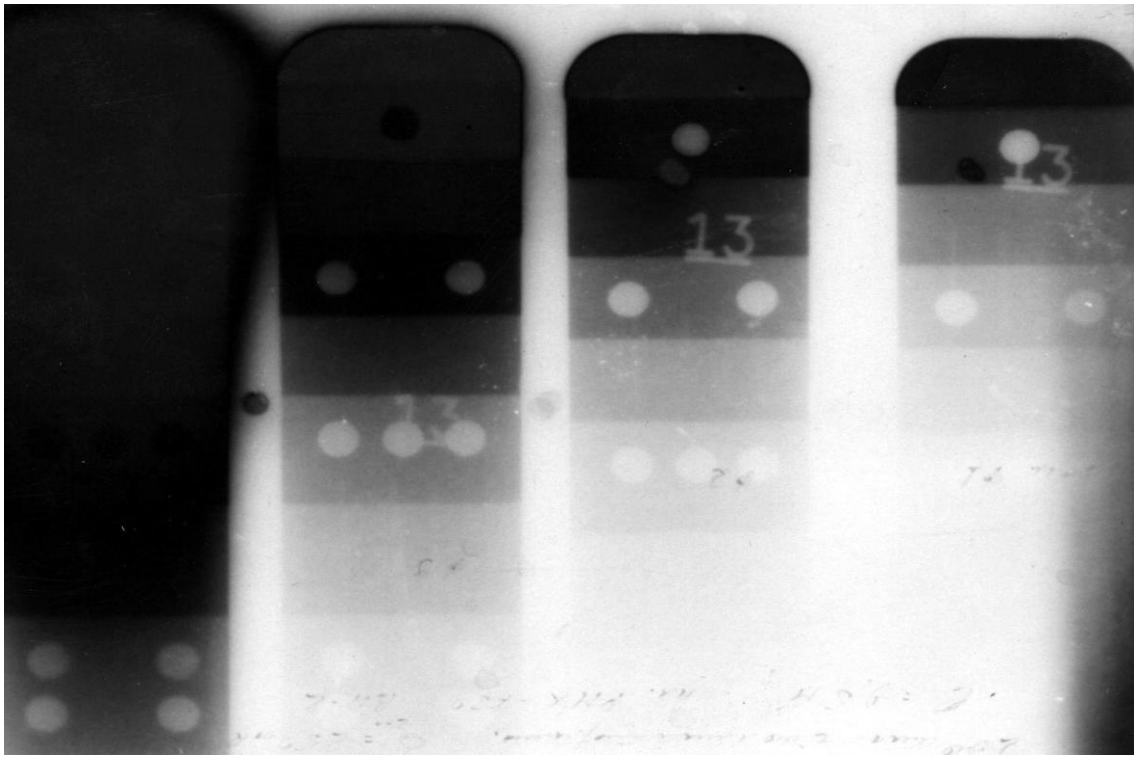
Рис. 1.1- Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока аппарата «Сарма-150»

Излучатель аппарата «Сарма-150» выполнен в виде двухярусной конструкции, на верхнем ярусе которой расположен высоковольтный блок, а на нижнем управляемый разрядник и плата схемы управления.

Высоковольтный блок аппарата заполнен смесью элегаза и азота под давлением 1,5 МПа. Благодаря газовой изоляции в конструкции отсутствует температурный компенсатор, а диапазон температуры эксплуатации прибора составляет от -30^0С до $+ 50^0$С.

Для получения высоких параметров рентгеновского импульса в аппарате «Сарма-150» используется импульсная рентгеновская трубка собственной разработки.

Выпускаемые серийно малогабаритные трубки типа ИМА-2-150Д, ИМА-6 и ИМА-5-320Д [6] не устраивали разработчиков ПИРА по ряду причин. Рентгеновская трубка ИМА-2-150Д не подходит для аппаратов с газовой изоляцией, так как имеет изолятор в виде внутреннего обратного конуса из стекла, который не выдерживает высокого давления и разрушается уже при 2 ати. Кроме того, трубки плоской конструкции с цилиндрическим трубчатым лезвийным катодом обладают большим размером фокусного пятна, что недопустимо для аппаратов, предназначенных для исследования быстропротекающих процессов. Записанные в паспорте на трубку ИМА-2-150Д данные о размере фокусного пятна от 2,3 до 3 мм не соответствуют действительности. В качестве эксперимента на рентгеновскую трубку ИМА-2-150Д, которой оснащаются серийно выпускаемые дефектоскопы АРИНА-1, поочередно надевались свинцовые коллиматоры с диаметром отверстия 3, 2 и 1 мм соответственно. Рентгенограммы стального клина, полученные за одинаковое количество импульсов и с одного расстояния, приведены на рисунке 1.2.



а б в г

а – рентгенограмма клина без коллиматора;

б – рентгенограмма клина с коллиматором диаметром 3мм;

в – рентгенограмма клина с коллиматором диаметром 2мм;

г – рентгенограмма клина с коллиматором диаметром 1мм.

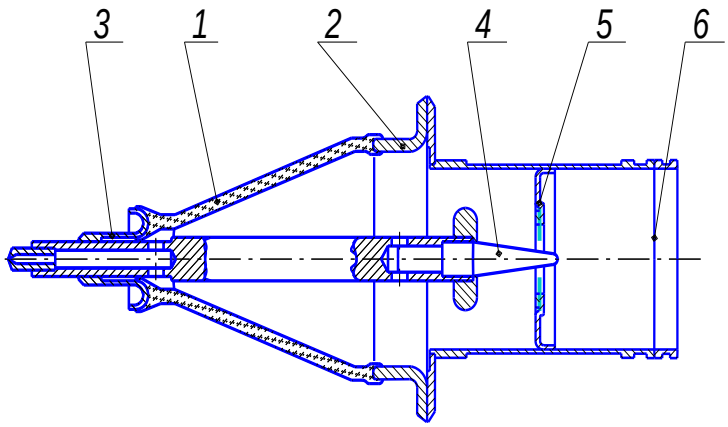
Рисунок 1.2 - Рентгенограммы стального клина

Из рисунка видно, что даже коллиматор диаметром 3 мм в несколько раз снижает просвечивающую способность аппарата. Это говорит о большом размере фокусного пятна трубок такой конструкции. Поэтому качество рентгенограмм, полученных с помощью таких трубок, очень низкое. Рентгеновская трубка ИМА-5-320Д так же имеет достаточно большой размер фокусного пятна около 3 мм, а ее импеданс велик по сравнению с внутренним сопротивлением аппарата «Сарма-150».

Трубка ИМА-6, удовлетворяющая по размерам фокусного пятна, не подходит из-за слишком маленького зазора между катодом и анодом. В результате рассогласования, трубка не обеспечивала зкспозиционной дозы рентгеновского излучения, достаточной для рентгенографирования требуемых объектов.

За основу новой рентгеновской трубки были взята рентгеновская трубка типа ИМА-6. Существенные изменения были внесены в конструкцию элементов металлостеклянных спаев изолятора трубки. У серийно выпускаемых трубок стекло припаивается к конструктивным ножевым элементам. Это обеспечивает надежность пайки, но наличие острий приводит к тому, что стеклянные изоляторы не выдерживают длительную эксплуатацию под напряжением от 150 кВ и более. На поверхности стеклянного изолятор образуются коронные разряды, которые, в конечном счете, приводят к пробою по поверхности изолятора.

На рисунке 1.3 показан продольный разрез трубки новой конструкции.



1 – изолятор,
2 – корпус трубки,
3 – шток трубки,
4 – анод,
5 – катод,
6 – выходное окно.

Рисунок 1.3 - Продольный разрез рентгеновской трубки

Видно, что изолятор поз.1 припаивается к поверхностям конструктивных элементов трубки – корпусу поз.2 и грибку штока поз.3, имеющим не острия, а радиусы. Это обеспечивает снижение напряженности электрического поля на концах изолятора. Трубки такой конструкции

способны работать с напряжением до 400 кВ, с частотой до 20 Гц и длительностью импульсов до 5нс без поверхностных пробоев по изолятору. Анод поз.4 изготавливается из вольфрамового прутка диаметром 4 мм. Дисковый катод поз.5 выполнен из вольфрамовой фольги толщиной 20 мкм. Выходное окно поз.6 выполнено из нержавеющей стали толщиной 50 мкм. Диаметр фокусного пятна в зависимости от условий эксплуатации и по желанию заказчика может составлять от 1,5 до 2,5 мм. Трубка обеспечивает безопасную эксплуатацию аппаратов с газовой изоляцией и выдерживает давление до 3 МПа.

Параметры аппарата «Сарма-150» представлены в таблице 1.1.

Аппарат «Сарма-150» позволяет получать теневые картины объектов при фокусном расстоянии до 1м при использовании рентгеновской пленки чувствительностью не менее 900-1000$Р^{-1}$ и флуоресцентных усиливающих экранов.

Таблица 1.1 Параметры рентгеновского аппарата «Сарма-150»

Рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки, кВ	150
Диаметр фокусного пятна, мм	2,3
Экспозиционная доза рентгеновского излучения на расстоянии 1м от анода, мР, не менее	0,15
Длительность рентгеновского импульса, нс, не более	7
Масса высоковольтного блока, кг	4

2 Рентгеновские аппараты серии «Аргумент»

2.1 Рентгеновские аппараты «Аргумент-200» и «Аргумент-200К»

В целях получения более полной информации о быстродвижущихся объектах (пространственное расположение объекта) в Сарове разработан импульсный рентгеновский аппарат «Аргумент-200К», позволяющий проводить двухплоскостное рентгенографирование.

Аппарат разработан на основе ПИРА «Аргумент-200» [15].

Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока аппарата «Аргумент-200» представлена на рисунке 2.1. Первичный конденсатор С1, номиналом 0,22 мкФ, заряжается от пульта управления до напряжения 9,8 кВ и находится в заряженном состоянии до подачи поджигающего импульса от трансформатора Тр.2. Конденсатор С3 заряжается до напряжения 300 В. После подачи в нужный момент на тиристор VD1 запускающего импульса, он

открывается и конденсатор С3 разряжается на первичную обмотку трансформатора Тр.2. Во вторичной обмотке трансформатора Тр.2 возникает импульс напряжения амплитудой 5 кВ, который через конденсатор С2 подается на управляющий электрод первичного коммутатора FV1.

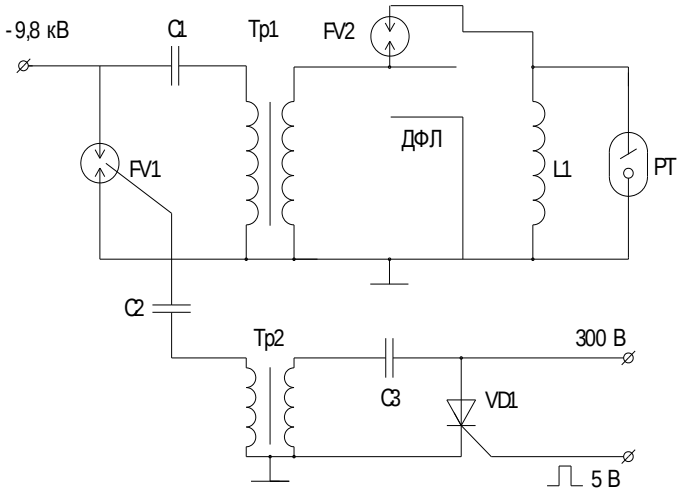


Рисунок 2.1–Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока аппарата «Аргумент-200»

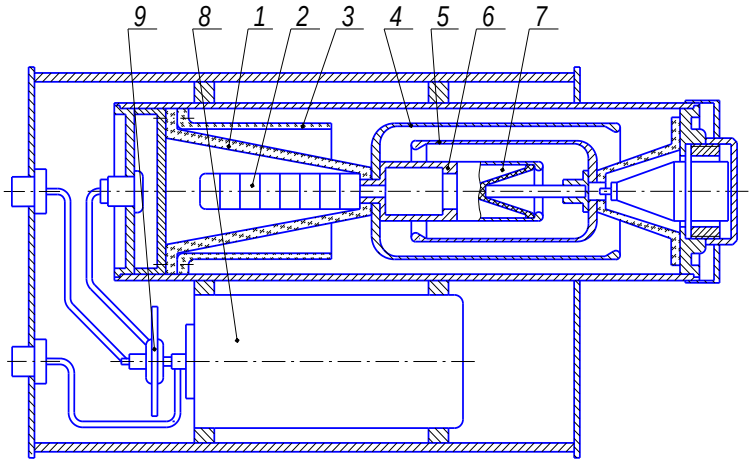
После пробоя коммутатора, конденсатор С1 разряжается на первичную обмотку импульсного резонансного трансформатора Тр.1. Возникающий во вторичной обмотке импульс напряжения подается на двойную формирующую линию (ДФЛ), которая, в свою очередь, после пробоя высоковольтного разрядника-обострителя FV2, разряжается на анод рентгеновской трубки Р.Т.. При этом происходит генерирование импульса тормозного излучения.

На рисунке 2.2 представлен продольный разрез высоковольтного блока аппарата «Аргумент-200». Для обеспечения величины электрической емкости вторичного накопителя 250 пФ в относительно небольших габаритах высоковольтного блока была применена конструкция, состоящая из трех коаксиальных кондукторов поз.4,5,6, вставляемых друг в друга. Зазор между ними составляет 6мм. Этого достаточно, чтобы выдержать максимальное напряжение 260 кВ без пробоя между кондукторами при наполнении блока смесью, состоящей из 25% SF_6 и 75% N_2 под давлением 2,5 МПа.

В качестве высоковольтного разрядника-обострителя поз.7 используется модернизированный разрядник РИМ 200/50, имеющий наружный диаметр 56 мм, и настраиваемый на напряжение от 200 до 240 кВ, в зависимости от решаемых задач.

Следует отметить, что изначально разрядники серии РИМ, разрабатывались для работы в среде трансформаторного масла. При работе в среде газового диэлектрика нарушается равномерность поля вдоль поверхности керамического изолятора разрядника. Это приводит к снижению электрической прочности от 20% до 30% и уменьшению ресурса. Поэтому с помощью компьютерного моделирования была найдена оптимальная форма высоковольтного вывода

разрядника [19], позволившая избежать потери электрической прочности. На рисунке 2.3 представлено распределение эквипотенциалей электрического поля внутри разрядника с высоковольтным выводом, улучшающим равномерность тангенциальной составляющей напряженности поля.



1 – высоковольтный импульсный трансформатор,

2 – сердечник магнитопровода,

3 – каркас первичной обмотки,

4, 5, 6 – коаксиальные кондукторы,

7 – разрядник-обостритель,

8 – первичный конденсатор,

9 – первичный управляемый разрядник.

Рисунок 2.2 – Продольный разрез высоковольтного блока

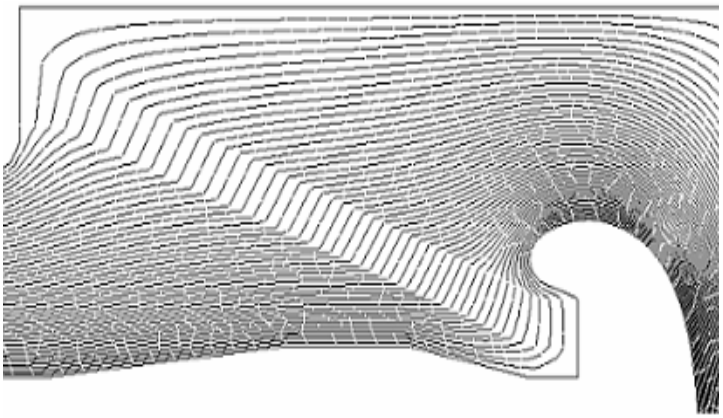


Рисунок 2.3 - Распределение эквипотенциалей электрического поля внутри разрядника

Высоковольтный импульсный трансформатор поз.1 (см. рисунок 2.2) имеет 300 вторичных витков провода ПЭТВ-2 диаметром 0.32 мм и 5 первичных витков из медной фольги толщиной 20 мкм и шириной 80 мм на каркасе поз.3. Сердечник магнитопровода поз.2 собирается из ферритовых колец марки 1000НМ3 с наружным диаметром 50 мм. КПД трансформатора при работе на емкостную нагрузку 250 пФ составляет 60%. Трансформатор работает на второй полуволне электромагнитных колебаний. Соотношение амплитуд второй и первой полуволн 2,45.

В качестве первичного конденсатора поз.8 используется серийно выпускаемый конденсатор К-75-48 номиналом 0,22мкф. Первичный управляемый разрядник поз.9 – типа РУ-62.

«Аргумент-200» оснащается рентгеновской трубкой, аналогичной описанной в 1 главе, но с увеличенным диаметром отверстия катода.

Основные параметры ПИРА «Аргумент-200» приведены в таблице 2.1. Аппарат позволяет проводить рентгенографирование исследуемых объектов при расстоянии между кассетой с пленкой и рентгеновской трубкой до 2,5 м.

Таблица 2.1 - Параметры рентгеновского аппарата «Аргумент-200»

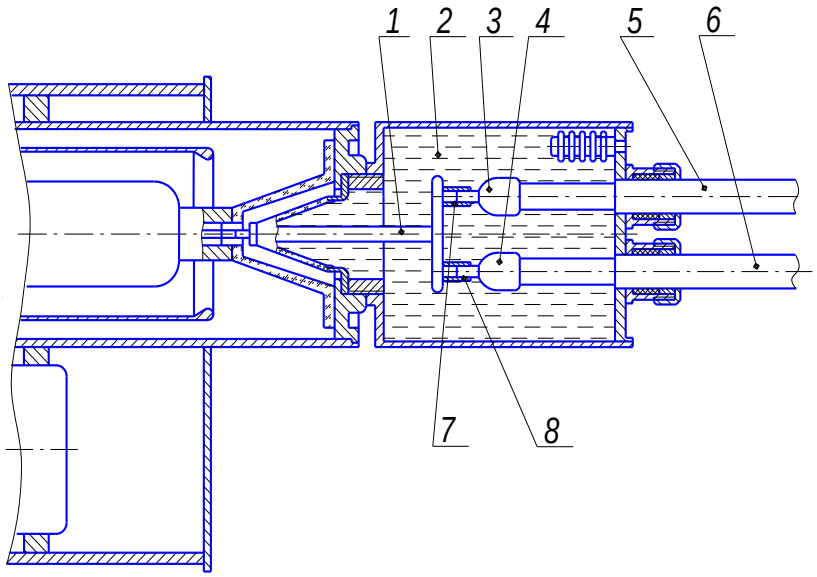
Параметр аппарата	Значение параметра
Рабочее напряжение на аноде рентгеновской трубки, кВ,	200 - 240
Диаметр фокусного пятна, мм	1,8 - 2,5
Экспозиционная доза рентгеновского излучения за 1 импульс на расстоянии 1м от анода, мР, не менее	0,8
Толщина стали, доступная для рентгенографирования на расстоянии 1м от анода, мм	5
Длительность рентгеновского импульса, нс, не более	4
Масса высоковольтного блока, кг	12

На рисунке 2.4 представлена фотография высоковольтного блока рентгеновского аппарата «Аргумент-200».

На рисунке 2.5 показан продольный разрез высоковольтного блока аппарата «Аргумент-200К». Главное отличие от аппарата «Аргумент-200» заключается в том, что высоковольтный блок нагружается на два параллельных кабеля поз.5 и поз.6 марки КВИ – 120.

Рисунок 2.4 - Высоковольтный блок рентгеновского аппарата «Аргумент-200»

Подсоединение происходит в специальном отсеке поз.2, наполненном трансформаторным маслом, при помощи кабельных наконечников поз.3 и поз.4, переходника поз.1 и цанговых зажимов поз.7, 8. Отсек поз.2 заполняется трансформаторным маслом из соображений более простой и быстрой замены выносной головки с кабелем в случае их повреждения в процессе экспериментов. Существует вариант аппарата, у которого подсоединение происходит в газонаполненном отсеке.



1 – переходник,

2 – масляный отсек,

3,4 – кабельные наконечники,

5,6 – параллельные кабели

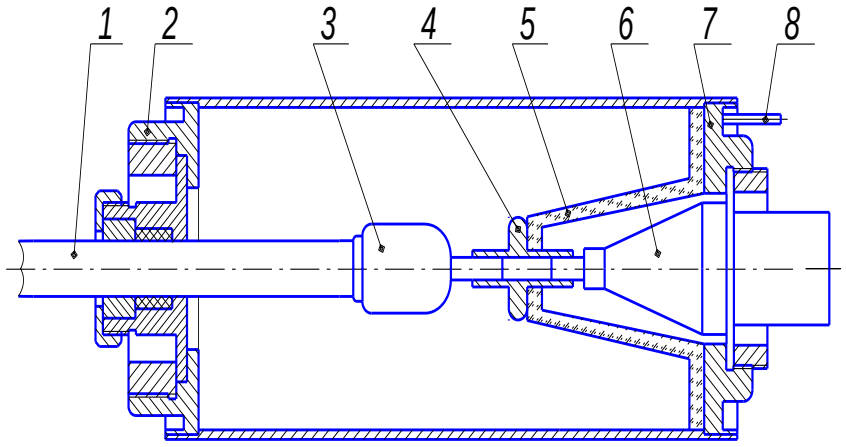
7,8 – цанговые зажимы.

Рис. 2.5 – Продольный разрез высоковольтного блока аппарата «Аргумент-200К»

В результате проведенных экспериментов было установлено, что кабель КВИ-120 выдерживает эксплуатацию без пробоев изоляции при напряжении до 160 кВ и длительности импульсов до 10 нс. При амплитуде напряжения 180 кВ наработка до пробоя составляет от 10 до 20 импульсов, при амплитуде 200 кВ – от одного до трех импульсов. На основании полученных экспериментальных данных, для надежной работы аппарата, было принято решение обеспечить напряжение на каждом из кабелей в диапазоне 140-150 кВ.

Так как волновое сопротивление кабеля КВИ – 120 составляет 60 Ом, то суммарное сопротивление двух параллельно подключенных кабелей составляет 30 Ом. Выходное сопротивление высоковольтного блока генератора примерно 60 Ом. При напряжении пробоя разрядника-обострителя 220 кВ на каждом кабеле возникает импульс напряжения амплитудой 140 -150 кВ.

К противоположным концам высоковольтных кабелей подключены выносные головки рентгеновских трубок. На рисунке 2.6 представлен продольный разрез выносной головки рентгеновской трубки. Высоковольтный кабель поз.1 передающей линии подсоединяется к заднему фланцу поз.2. Наконечник центрального проводника кабеля поз.3 вставляется в цангу поз.4. К этой же цанге подключена импульсная рентгеновская трубка поз.6. Цанга крепится к переднему фланцу поз.7 с помощью изолятора поз.5. В качестве основного диэлектрика в выносных головках применяется смесь элегаза и азота под давлением 1,5 МПа. Вакуумирование и наполнение объема выносной головки смесью газов производится через штенгель поз.8.



1 – высоковольтный кабель,
2 – задний фланец,
3 – наконечник,
4 – цанга,
5 – изолятор,
6 - рентгеновская трубка,
7 - передний фланец,
8 – штенгель.

Рис. 2.6 - Продольный разрез выносной головки рентгеновской трубки

В ходе разработки аппарата были проведены эксперименты по определению влияния длины передающей кабельной линии на выходные параметры.

Выносные головки подключались к передающим кабельным линиям длинной 2,5, 5 и 10 м. Экспозиционная доза рентгеновского излучения у трубки, расположенной в выносной головке с кабелем длинной 5 м, уменьшалась на 25% по сравнению с трубкой, расположенной в выносной головке с кабелем длинной 2,5 м. В случае с кабелем длинной 10 м, доза уменьшалась на 40%. При этом длительность рентгеновского импульса у трубки с кабелем длинной 2,5 м составляет 5 нс, длительность фронта импульса 4 нс . Длительность рентгеновского импульса у трубки в выносной головке с кабелем длинной 5 м составляет 5,5 нс, длительность фронта импульса 4,5 нс. С увеличением длинны кабеля до 10 м длительность фронта импульса возрастает до 5 нс, а длительность импульса до 6 нс.

Из-за больших потерь дозы излучения, было принято решение о применении кабелей длинной не более 2,5 м.

Параметры аппарата «Аргумент-200К» представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Параметры рентгеновского аппарата «Аргумент-200К»

Параметр аппарата	Значение параметра
Напряжение срабатывания разрядника-обострителя, кВ	220
Напряжение на аноде рентгеновской трубки, кВ	140 - 150
Диаметр фокусного пятна, мм	1,8 - 2,5
Экспозиционная доза рентгеновского излучения за 1 импульс на расстоянии 10 см от анода для каждой из трубок, мР, не менее	30
Расстояние от торца аппарата до кассеты с пленкой, при котором возможно получение теневой картины, не менее, м	1
Длительность рентгеновского импульса на полувысоте амплитуды, нс, не более	5
Масса высоковольтного блока без кабелей, кг	15

2.2 Рентгеновские аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент»

Метод импульсного рентгенографирования широко применяется в экспериментальных террадинамических исследованиях. Эти исследования заключаются в изучении физических

процессов внедрения моделей проникателей в различные виды естественных грунтовых (пески, глины, доломиты, известняки и т.д.) и искусственных (бетоны различных марок) преград. Учитывая непрозрачность перечисленных сред для оптических средств регистрации, использование рентгенографического метода в экспериментах дает возможность визуализации процесса проникания и является, поэтому практически основным инструментом получения информации по террадинамическим параметрам, необходимой для проверки технических решений, а так же тарировки инженерных и численных методик [20].

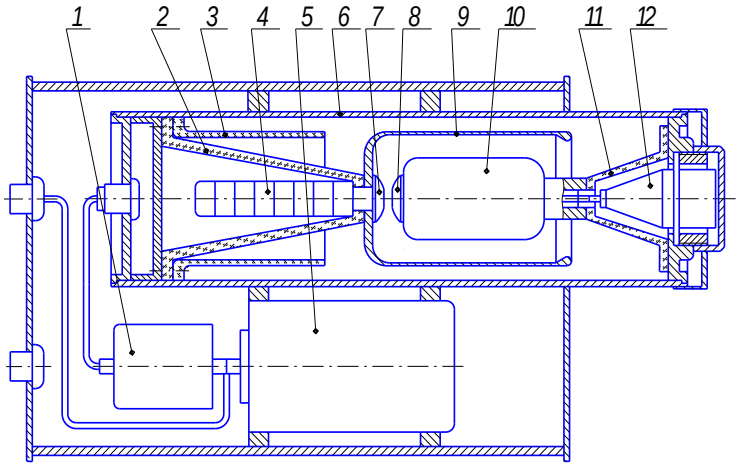
Полученные в опытах рентгеновские снимки позволяют в конкретный момент времени наблюдать состояние проникателя (есть или нет деформация) в зависимости от скорости внедрения, определять X – t диаграмму движения и темп раскрытия образующейся каверны, а, следовательно, устанавливать закономерность течения среды преграды [21].

Основным критерием применимости в экспериментах рентгенографического метода является соотношение диаметра модели и толщины просвечиваемой преграды, которое обеспечивает выполнение условия полубесконечности, и контрастность получаемых снимков с учетом конструкции защиты кассеты. Исходя из калибров метательных установок, используемых для разгона моделей в опытах, и вопросов отсутствия масштабных эффектов, как правило, используются модели диаметром от 5 до 50 мм. Применяемые до последнего времени рентгеновские аппараты «МИН» и «КАВКАЗ» [7] позволяют с приемлемой контрастностью просвечивать, в зависимости от плотности среды, преграды толщиной до 120 мм. Это существенно ограничивает исследования с диаметром моделей более 20 - 30 мм, так как оптимальное соотношение толщины преграды к диаметру модели, по результатам расчетных оценок, составляет от 6 до 8. Разработанные в Сарове «Аргумент-700» и «Аргумент», как показывают проведенные испытания, способны просветить до 150 – 200 мм соответственно даже наиболее сложную, с точки зрения возникновения рассеянного излучения, преграду типа «сухой песок». Это обстоятельство значительно расширяет возможности использования рентгенографической методики в террадинамических исследованиях, особенно в плане проведения испытаний на моделях с диаметром миделя более 20 – 30 мм. При этом обеспечивается выполнение условия полубесконечности на более длительные времена проникания, пока отраженные от свободных поверхностей или стенок контейнера преграды волны не исказят картину течения грунтовой среды.

Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока ПИРА «Аргумент-700» идентична схеме аппарата «Аргумент-200», но первичный конденсатор С1, номиналом 0,22 мкФ, заряжается от пульта управления до напряжения 17 кВ.

На рисунке 2.7 представлен продольный разрез высоковольтного блока аппарата «Аргумент-700». Высоковольтный импульсный трансформатор имеет 440 витков вторичной поз.2

и шесть витков первичной поз.3 обмотки. Сердечник поз.4 набран из ферритовых колец марки 1500НМ3 с наружным диаметром 50 мм. Трансформатор заряжает двойную формирующую линию (ДФЛ) на второй полуволне электромагнитных колебаний. КПД трансформатора при работе на емкостную нагрузку 55пФ составляет 50 %. Соотношение амплитуд второй и первой полуволн составляет 2,2. Собственная емкость трансформатора 15 пФ. Электрическая емкость между корпусом высоковольтного блока поз.6 и промежуточным кондуктором поз.9 ДФЛ – 25пФ, волновое сопротивление 19 Ом. Электрическая емкость между промежуточным поз.9 и внутренним поз.10 кондукторами - 15 пФ, волновое сопротивление 28 Ом. Зазор между электродами поз.7,8 разрядного промежутка составляет 8 мм. Внутренний кондуктор ДФЛ крепится к каркасу поз.11 индуктивности, шунтирующей рентгеновскую трубку поз.12. Собранный и заваренный высоковольтный блок вакуумируется и наполняется смесью из 1% Kr, 24 % SF_6 и 80% N_2 под давлением 2,5 МПа.



1 –первичный разрядник,
2 – вторичная обмотка трансформатора,
3 – первичная обмотка трансформатора,
4 – сердечник магнитопровода,
5 – первичный конденсатор,
6 – корпус высоковольтного блока,
7 – электрод,
8 – электрод,
9 – промежуточный кондуктор,
10 – внутренний кондуктор,
11 – индуктивность,
12 – рентгеновская трубка.

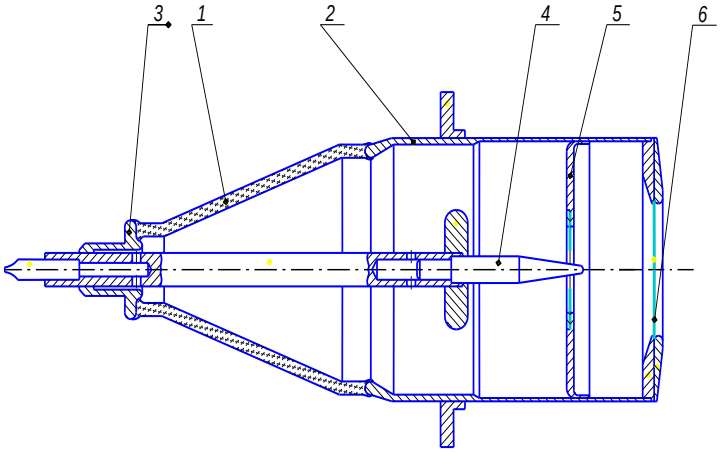
Рисунок 2.7 - Продольный разрез высоковольтного блока аппарата «Аргумент-700»

Первичная емкость поз.5 - серийно выпускаемый конденсатор К-75-48 номиналом 0,22 мкФ. В качестве первичного коммутатора поз.1 используется управляемый разрядник собственного изготовления с керамическим изолятором.

Питание излучателя осуществляется от пульта управления через соединительный кабель длиной до 50 м.

Для аппарата «Аргумент-700» была разработана специальные рентгеновская трубка.

Продольный разрез трубки представлен на рисунке 2.8. Выпускаемые серийно рентгеновские трубки серий ИМА и ИА имеют ножевую конструкцию спаев стеклянного изолятора и металлического корпуса. Наличие острия в месте спая существенно увеличивает напряженность электрического поля. Это приводит к увеличению размеров стеклянного изолятора и всей трубки в целом. Благодаря применению спаев стеклянного изолятора поз.1 с металлическими поверхностями корпуса поз.2 и штока поз.3, имеющих радиусы, удалось создать трубку, которая может эксплуатироваться при напряжении до 1,2 МВ и длительности импульса до 5 нс без пробоев по поверхности изолятора. При этом масса и габариты ускорительной трубки существенно меньше серийных трубок, рассчитанных на рабочее напряжение до 1 МВ.



1 – стеклянный изолятор,
2 – корпус трубки,
3 – шток,
4 – анод,
5 – катод,
6 – выходное окно.

Рисунок 2.8 - Продольный разрез рентгеновской трубки

Анод поз.4 выполняется из вольфрамового прутка диаметром от 3 до 5 мм в зависимости от требуемого размера фокусного пятна. Угол конуса при вершине составляет 15^0. Диаметр отверстия вольфрамового катода поз.5, изготовленного из фольги, толщиной 20 мкм, выбирался экспериментально, с целью достижения максимальной просвечивающей способности аппарата. Диаметр фокусного пятна может составляет от 1,6 до 3,8 мм в зависимости от условий эксплуатации и требований, предъявляемых к ПИРА. Выходное окно поз.6 выполнено из

нержавеющей стали, толщиной 50 мкм. Трубка имеет следующие габаритные размеры: диаметр - 54 мм, длинна – 120 мм.

Форма рентгеновского импульса ПИРА «Аргумент-700» представлена на рисунке 2.9.

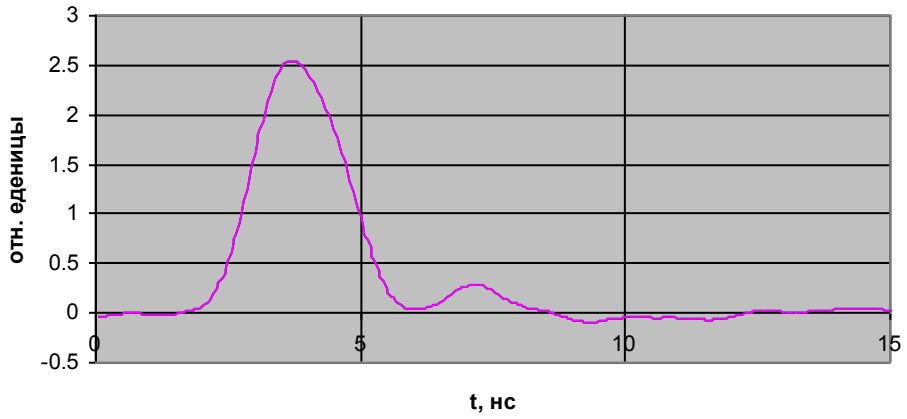


Рисунок 2.9 - Рентгеновский импульса аппарата «Аргумент-700»

Внешний вид высоковольтного блока аппарата «Аргумент-700» представлен на рисунке 2.10.

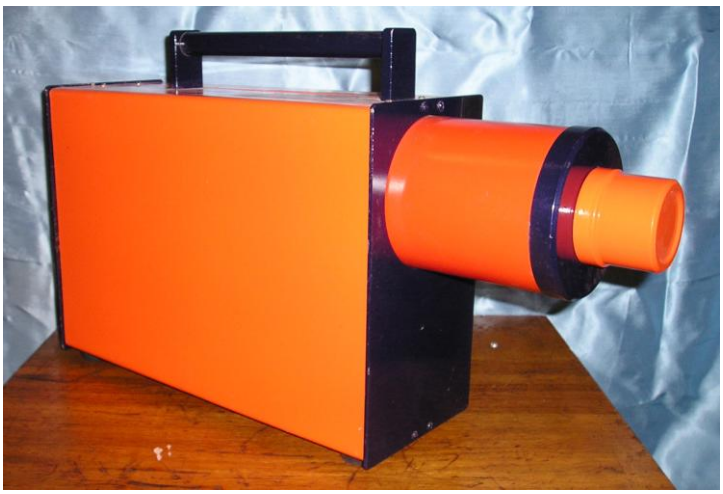


Рисунок 2.10 – Внешний вид высоковольтного блока аппарата «Аргумент-700»

Аппарат «Аргумент», в отличие от аппарата «Аргумент-700», имеет масляную изоляцию и разработан на основе многокаскадного генератора импульсов напряжения Аркадьева-Маркса (ГИН), нагружаемого на серийную рентгеновскую трубку типа ИА-10. По своим характеристикам «Аргумент» превосходит ранее выпускавшиеся аппараты на основе ГИН «Кавказ-300» и «Кавказ-500». Но прекращение серийного изготовления импульсных рентгеновских трубок типа ИА-10 в НПО «Светлана» поставило вопрос о разработке нового прибора с аналогичными

параметрами, работающего на базе трубок, выпускаемых в Сарове. Такой прибор будет представлен ниже.

Аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент» имеют параметры, представленные в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Параметры аппаратов «Аргумент-700» и «Аргумент»

Параметры	Аргумент-700	Аргумент
Рабочее напряжение, кВ	800	1200
Размер фокусного пятна, мм	1,8 – 3,6	6
Просвечивающая способность по стали за импульс, мм	20	40
Длительность рентгеновского импульса на полувысоте амплитуды, нс	2	20
Экспозиционная доза рентгеновского излучения на расстоянии 0,5 м от анода за 1 импульс, мР	15	160
Масса излучателя, кг	25	150
Масса пульта управления, кг	2	6

3 Область применения переносных импульсных рентгеновских аппаратов

Рентгеновская аппаратура применяется при проведении испытаний на экспериментальных установках в основном по следующим направлениям:

-рентгеновская регистрация быстропротекающих процессов в воздушной среде;

-рентгеновская регистрация объектов испытаний движущихся в плотных средах (так называемые террадинамические испытания), таких как лед, песок, бетон, алюминий и т. п. с плотностью $\rho \geq 0.1$ г/см^3;

-дефектоскопия испытываемых объектов.

В воздушной среде регистрируются, как правило, аэробаллистические или аэродинамические объекты. Регистрация этих объектов производится на начальном участке траектории движения ($l \geq 0.5$ м), так как на этом участке реализуются максимальные скорости разгона, а среда оптически не прозрачна (мощные световые явления, дым, осколки и т.п.). При террадинамических испытаниях рентгеновская регистрация является основным методом получения визуальной информации для анализа состояния как испытываемого объекта, так и имитатора среды. Для регистрации объектов в воздушной среде применяются ПИРА «Сарма-150»,

«Аргумент-700», «Аргумент-200К», а в террадинамических экспериментах ПИРА «Аргумент» и «Аргумент-700».

4 Схема рентгенорегистрации на испытательном комплексе

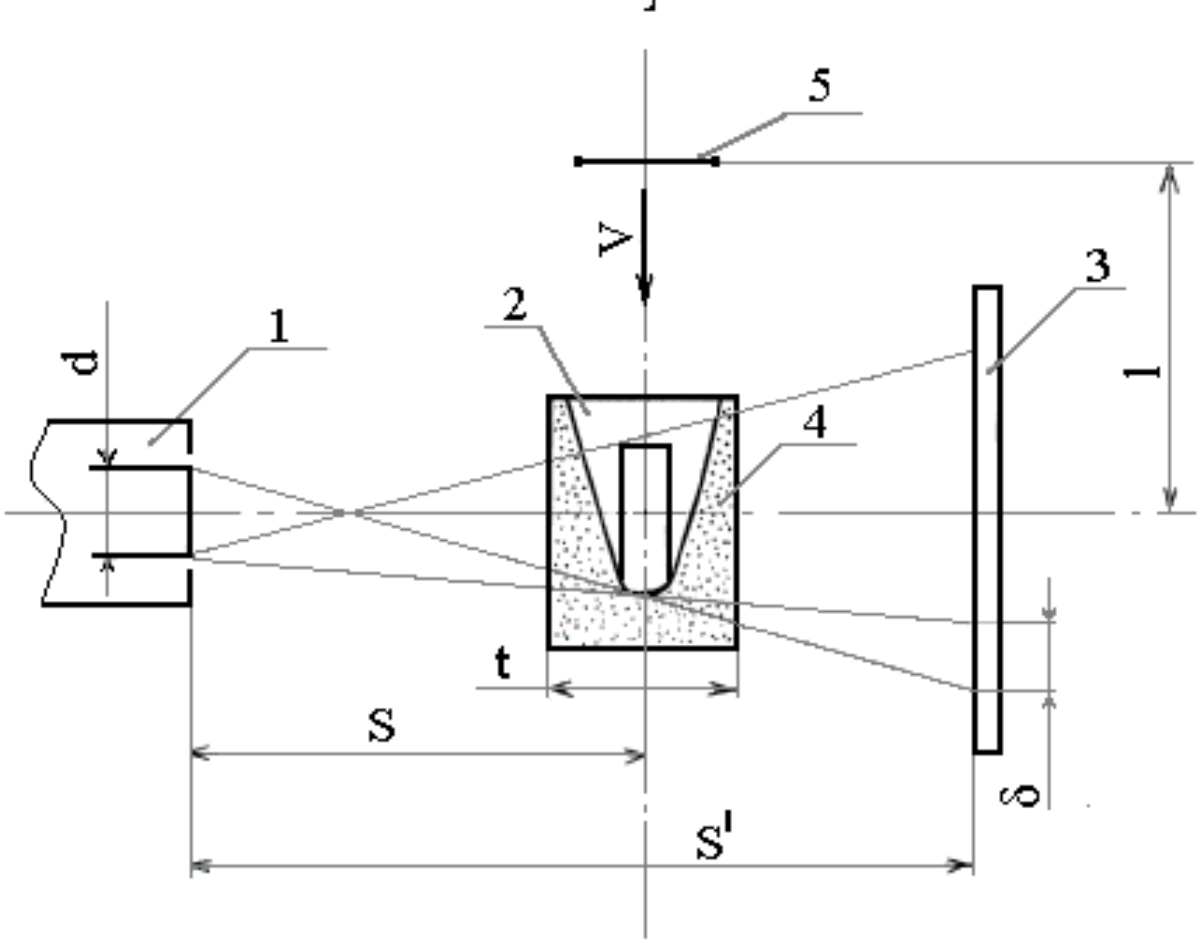
Импульсная рентгеновская регистрация, осуществляемая по классической схеме получения теневого изображения испытываемого объекта, представлена на рисунке 4.1 .

Объект испытаний поз.2, подлетая к зоне рентгенорегистрации, вызывает срабатывание датчика поз.5, который с временной задержкой равной $\tau_з = l/V$, запускает рентгеновский аппарат поз.1. С помощью импульса рентгеновского излучения на пленке поз.3 строится теневое изображение объекта поз.2, а в случае террадинамических испытаний и имитатора преграды поз.4.

Качество такой теневой картины определяется в основном следующими параметрами:

-геометрией схемы: соотношением линейных величин d, δ, S и $S^{|}$ [26];
-разрешающей способностью системы N (усиливающий экран плюс рентгеновская пленка) и чувствительностью рентгеновской пленки H [27,28];
-длительностью импульса излучения T [28];
-экспозиционной дозой излучения D_0, с учетом толщины просвечиваемой среды t и для ее плотности ρ коэффициентом линейного поглощения излучения μ [29].

Так как эксперименты сопровождаются ударными волнами, факелами пламени, осколками и т.п., то защита ПИРА и кассеты с рентгеновской пленкой осуществляется установкой защитных экранов из различных материалов и варьированием расстояний S и $S^{|}$.



1 – Рентгеновский аппарат,

2 – Объект испытаний,

3 – Кассета с рентгеновской пленкой,

4 – Имитатор преграды с $\rho \geq 0.1$ г/см^3,

5 – Датчик запуска рентгеновского аппарата.

Рисунок 4.1 – Схема импульсного теневого рентгенографирования.

Стереорентгенографирование объектов в воздухе осуществляется двумя рентгеновскими аппаратами ортогонально расположенными относительно друг друга либо внедряемым аппаратом «Аргумент-200К».

5 Результаты применения переносных импульсных рентгеновских аппаратов

Для аэробаллистических, аэродинамических объектов испытаний и процессов высокоскоростного соударения, то есть при рентгенографировании в воздухе, применяются ПИРА с экспозиционной дозой излучения $D_0 = 0.1 \div 10$ мР на объекте исследования.

При рентгенографировании отдельных фаз соударений, когда возникает широкое поле осколков и необходима защита аппарата и кассеты с рентгеновской пленкой, то есть увеличиваются размеры S и $S^{|}$ (см. рис.4.1), устанавливаются защитные экраны, а также в террадинамических экспериментах, когда плотность среды 0.1 г/см^3 и более, применяются ПИРА с экспозиционной дозой излучения $D_0 = 10 \div 100$ мР на объекте исследования.

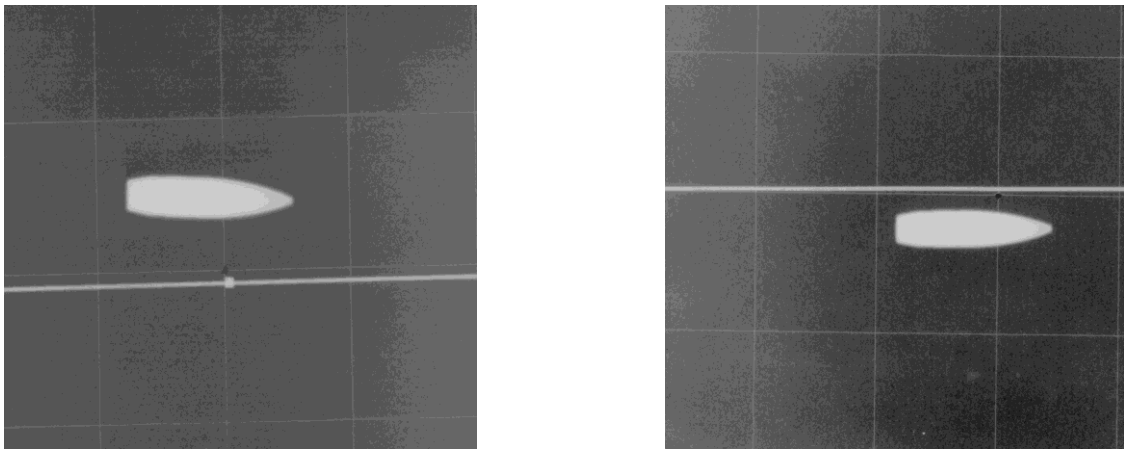
Так как в террадинамических испытаниях, среды типа: глина, песок, лед, бетон и т.п. являются источником дополнительного рассеяния рентгеновского излучения, а рентгенорегистрация осуществляется в широких пучках (минимальный размер рентгеновской пленки 30×40 см^2), то доля рассеянного излучения увеличивается, что снижает контрастность картины теневого изображения рентгенограммы.

Ниже представлены рентгенограммы, полученные в экспериментах в воздушной среде: аэробаллистические испытания, аэродинамические испытания, фрагменты высокоскоростных соударений, а также рентгенограммы состояния объектов и имитаторов сред в террадинамических испытаниях.

5.1 Рентгенорегистрация в воздушной среде

5.1.1 Аэробаллистические испытания

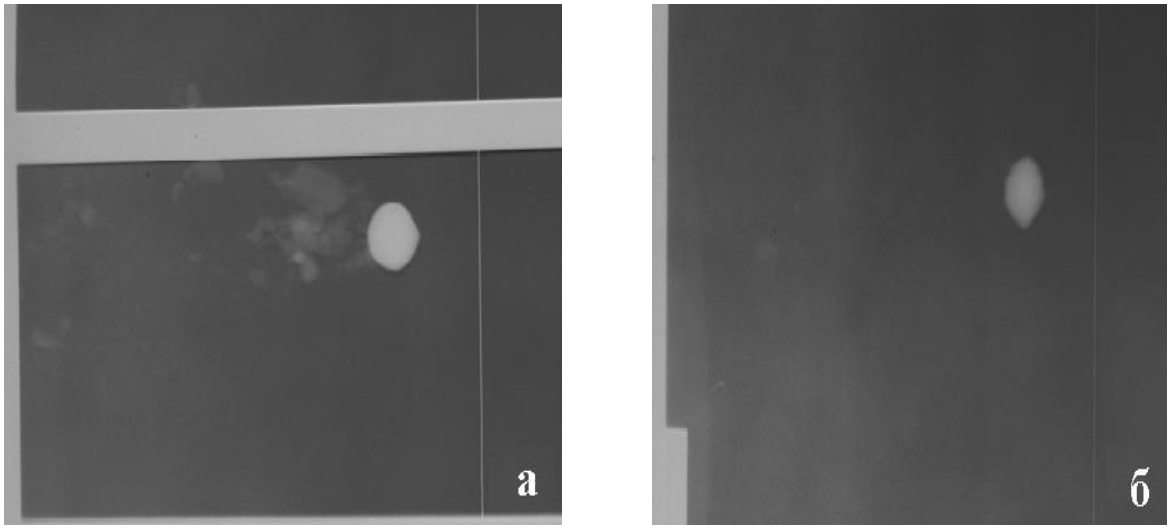
На стереорентгенограммах (см. рис. 5.1) представлены две проекции пули в заданной точке ее траектории. Стереорентгенорегистрация производилась на базе аппаратов «Сарма-150». Скорость пули – 700 м/с.



а) - горизонтальный снимок б) - вертикальный снимок

Рисунок 5.1 – Стереорентгенограммы пули в полете.

Состояние алюминиевого шарика, разгоняемого с помощью легкогазовой метательной установки до скорости 7000м/с, в двух точках его траектории на отрезке 10 м представлено на рисунке 5.2 «а», «б». Исследование степени уноса материала с поверхности высокоскоростного объекта при его движении в воздухе. Рентгенорегистрация производилась аппаратом «Сарма-150».



а) – на расстоянии 5 метров б) – на расстоянии 10 метров

Рисунок 5.2 – Рентгенограммы шарика в полете на расстоянии 5 и 10 метров от ствола метательной установки.

Рентгенограмма состояния и угловой ориентации пластины относительно вертикали, метаемой взрывным устройством типа “ПЦ” со скоростью 6800 м/с, на расстоянии 800 мм от точки подрыва представлена на рисунке 5.3 Регистрация производилась аппаратом «Сарма-150».

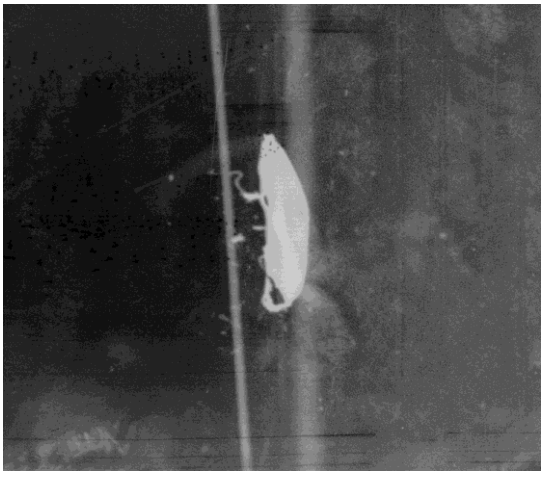


Рисунок 5.3 – Рентгенограмма пластины.

5.1.2 Аэродинамические испытания

Состояние и угловая ориентация относительно вертикали аэродинамического объекта сложной конфигурации, перемещающегося со скоростью 1500 м/с, на расстоянии 1.2 м от пороховой метательной установки представлена на рисунке 5.4 (а, б). Рентгенорегистрация производилась аппаратом «Сарма-150».

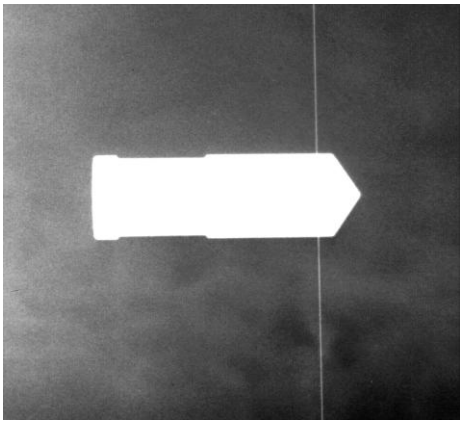
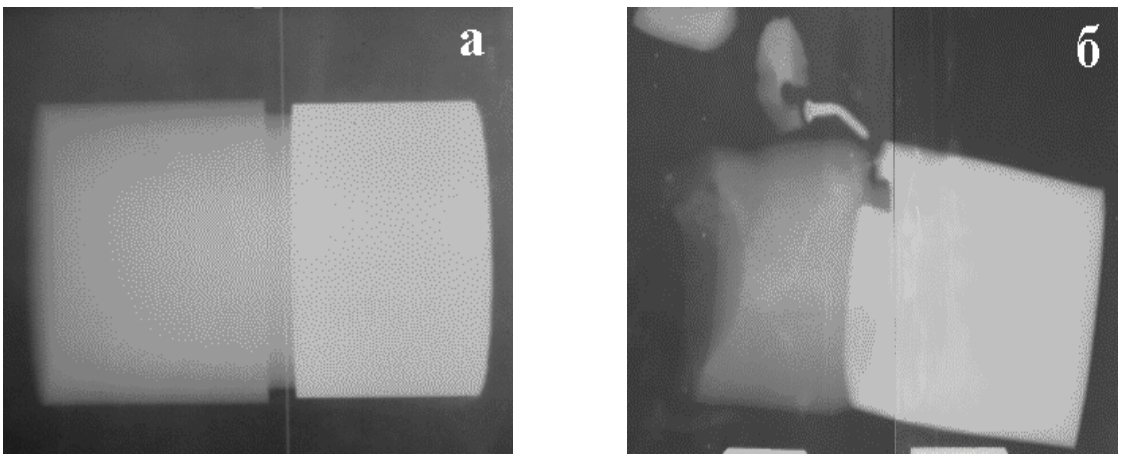


Рисунок 5.4 – Рентгенограмма объекта исследования в полете.

Угловая ориентация относительно вертикали и целостность аэродинамической сборки: полиэтиленовый цилиндр с алюминиевым и титановым наконечником в виде стакана, перемещающейся со скоростью соответственно 4200 м/с и 4800 м/с на расстоянии 3 м от легкогазовой метательной установки, представлены на рентгенограммах рисунок 5.5 (а, б). Рентгенорегистрация производилась аппаратом “Сарма-150”.



а) – наконечник из алюминия б) – наконечник из титана

Рисунок 5.5 – Рентгенограмма сборки ударника.

Кумулятивная струя штатного выстрела из гранатомета после пробития датчика запуска на расстоянии 0.6 метров от срабатывания заряда выстрела представлена на рентгенограмме – рисунок 5.6. Скорость развития струи 8200 м/с. Эксперимент по отработке средств защиты. Рентгенорегистрация производилась аппаратом «Аргумент-700».

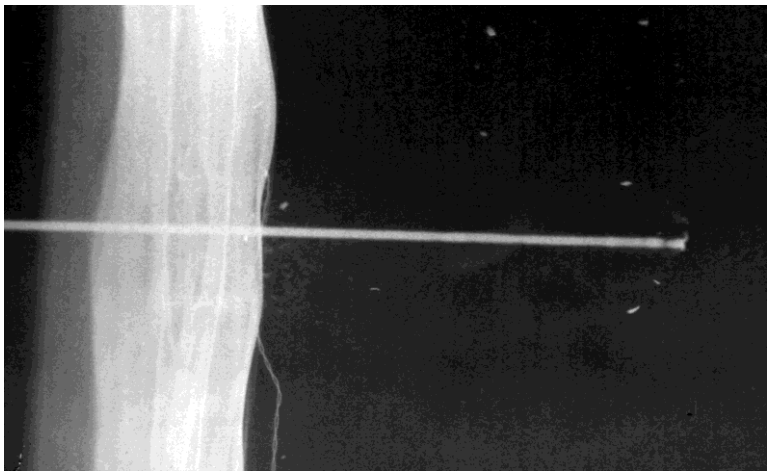
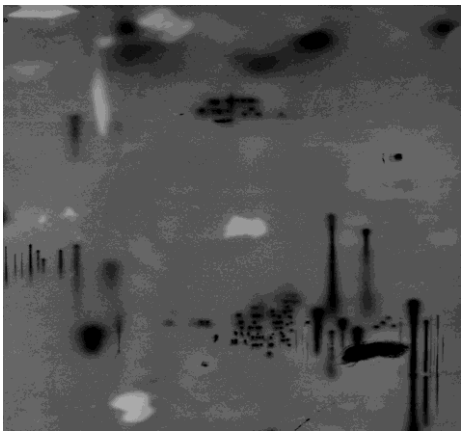


Рисунок 5.6 – Рентгенограмма кумулятивной струи.

Поле из шести осколков (компактных масс), летящих последовательно друг за другом по три штуки, сформированное метательной установкой типа ПЦ на расстоянии трех метров от нее, представлено на рентгенограммах – рисунок 5.7(а, б). Регистрация осуществлялась одновременно на две рентгеновские кассеты с помощью ПИРА “Аргумент-700”. Скорость осколков 4800 м/с.

а) – кассета №1



б) – кассета №2

Рисунок 5.7 – Рентгенограммы осколочного поля.

5.1.3 Фрагменты высокоскоростных соударений

На рентгенограмме – рисунок 5.8 представлена картина взаимодействия аэродинамической сборки (рисунок 5.5) с макетом из пластин, на расстоянии 5 метров от ствола легкогазовой метательной установки. Скорость перемещения сборки 4800 м/с. Регистрация производилась рентгеновским аппаратом «Аргумент».

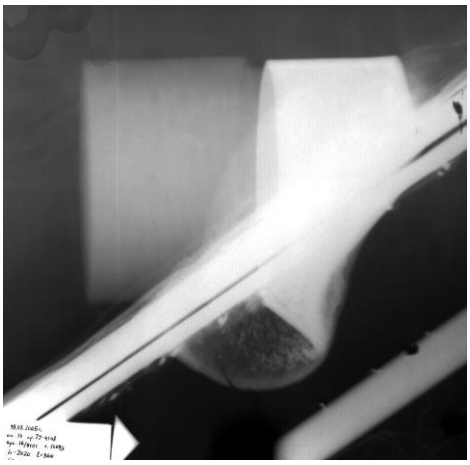
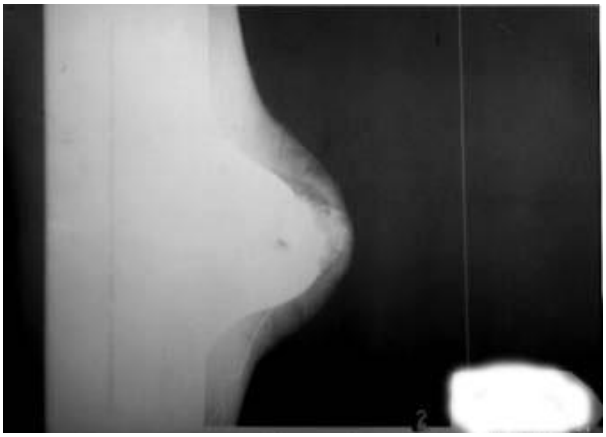
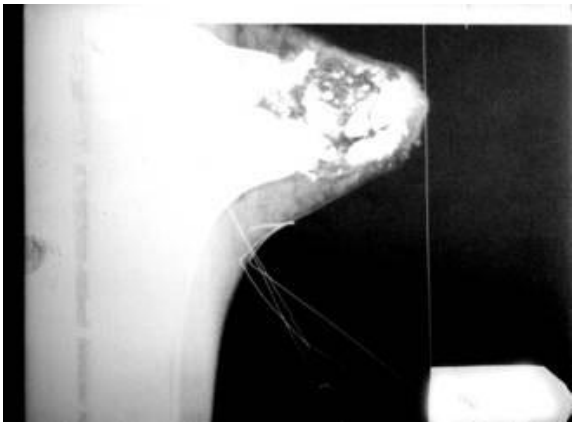


Рисунок 5.8 – Рентгенограмма состояния макета с датчиками через 25 мкс после соударения.

Картины пробития пулей испытываемых объектов представлены на рентгенограммах – рисунок 5.9 (а, б). Скорость пули 1100 м/с. Регистрация на расстоянии 6 метров от точки выстрела. Информация получена с помощью рентгеновского аппарата «Аргумент-700».



а) через 50 мкс после соударения



б) через 100 мкс после соударения

Рисунок 5.9 – Рентгенограммы пробития пулей объекта испытаний.

Фрагмент пробития пулей макета защитного средства представлен на рентгенограмме – рисунок 5.10. Скорость пули 1100 м/с, регистрация на расстоянии 2.5 метра от точки выстрела. Информация получена с помощью ПИРА “Аргумент-700”.

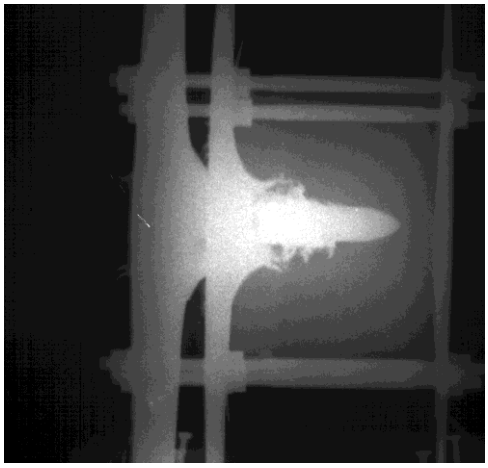


Рисунок 5.10 – Рентгенограмма фрагмента пробития пулей защитного средства.

5.2 Рентгенорегистрация в плотных средах

5.2.1 Террадинамические испытания

Состояние проникающего объекта диаметром 22 мм и имитатора преграды ρ=1.65 г/см^3 (песчаный грунт), толщиной 120 мм при скорости внедрения 1200 м/с представлено на рентгенограмме – рисунок 5.11. Регистрация с помощью ПИРА “Аргумент”.

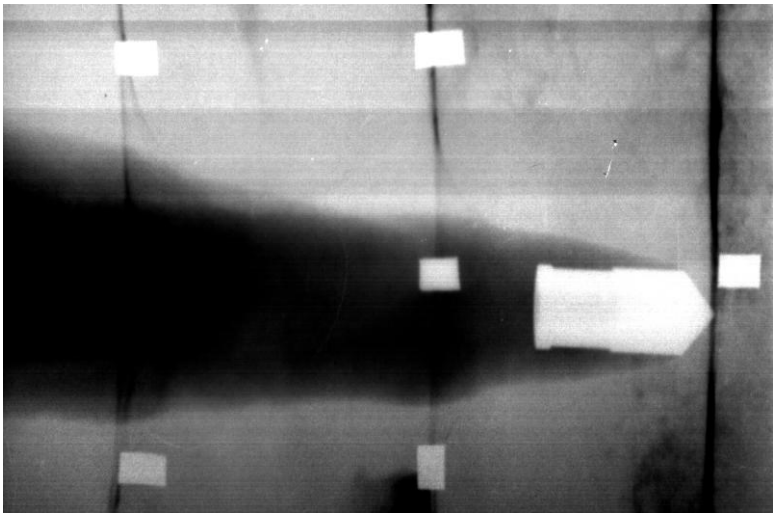


Рисунок 5.11 – Рентгенограмма проникающего объекта в песчаном грунте.

Рентгенограмма проникающего объекта диаметром 22 мм внутри имитатора преграды толщиной 170 мм на границе раздела сред «лед – вода» при скорости внедрения 1200 м/с представлена на рисунке 5.12. Регистрация с помощью ПИРА “Аргумент”.

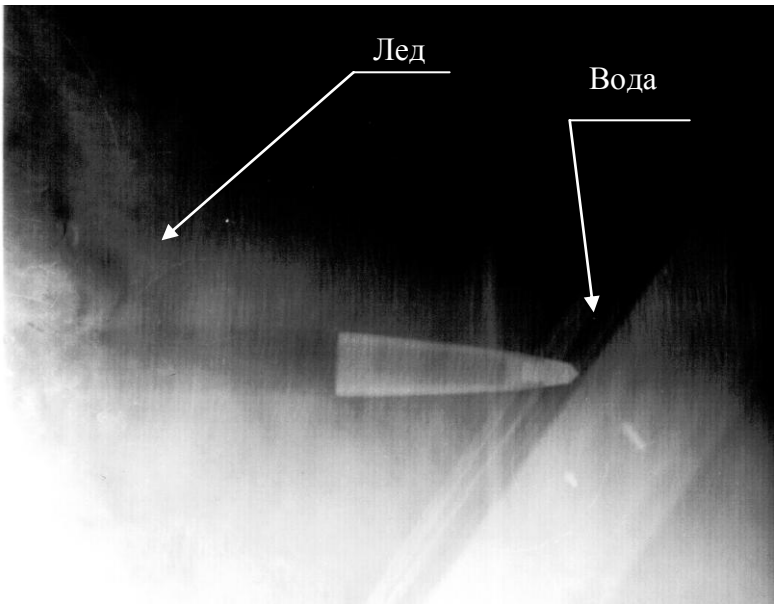


Рисунок 5.12 – Рентгенограмма проникающего объекта на границе раздела «лед – вода».

Момент заглубления проникающего объекта диаметром 60 мм во влажный песчаный грунт ρ=1.85 г/см^3 толщиной 160 мм при скорости внедрения 1000 м/с представлен на рентгенограмме – рисунок 5.13. Регистрация с помощью рентгеновского аппарата «Аргумент».

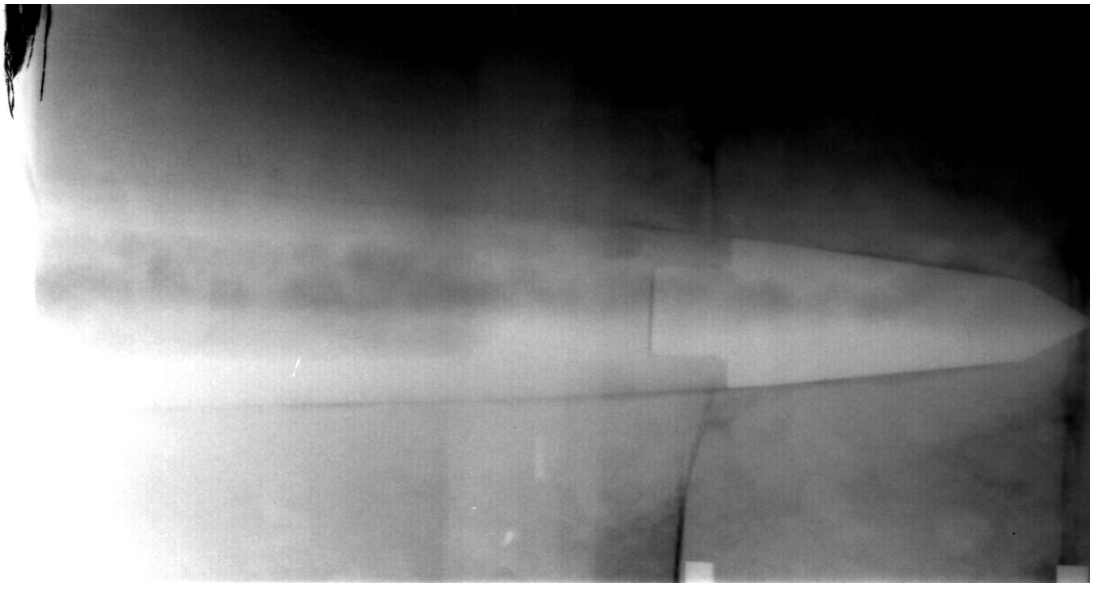


Рисунок 5.13 – Рентгенограмма проникающего объекта во влажном песчаном грунте.

6 Перспективы применения рентгеновских аппаратов для исследования быстропротекающих процессов

Из представленных в разделах 3 и 5 материалов следует, что все ПИРА в настоящее время в полной мере отвечают требованиям рентгенорегистрации на испытательном комплексе. Такие же ПИРА, как «Сарма-150», «Аргумент-200», «Аргумент-700», могут полностью заменить ПИРА типа НОРА, МИРА, МИН-4, «Кавказ-300» и «Кавказ-500», снятые с производства и на данный момент исчерпавшие свой ресурс (20 и более лет эксплуатации). Преимуществом ПИРА саровской разработки является высокая надежность и полная адаптированность к системам питания, запуска и управления, что подтверждается многолетней практикой их эксплуатации.

В ближайшее время будет введен в эксплуатацию ПИРА для стереорентгенографирования в воздушной среде «Аргумент-200К».

Применяемый в террадинамических экспериментах наиболее мощный ПИРА «Аргумент» из – за прекращения выпуска основных комплектующих изделий (рентгеновская трубка ИА-10 и т.д.) был изготовлен в единственном экземпляре. Поэтому на замену ПИРА «Аргумент» разработан ускоритель «Аргумент-1000» с газовой изоляцией высоковольтного блока.

Наиболее часто для получения высоковольтных импульсов в малогабаритных ускорителях используют схемы с разрядом накопительной линии (формирующей линии или двойной формирующей линии) или многокаскадные ГИН. Ускорители на основе ГИН имеют сложную конструкцию из-за большого количества разрядников-обострителей и накопительных конденсаторов. Настройка разрядников и ГИН в целом представляет собой непростую техническую задачу. Кроме того, из-за большей индуктивности разрядного контура время протекания тока в нагрузке (в нашем случае в ускорительной трубке) существенно превышает время протекания тока в нагрузке ускорителей с ДФЛ при одинаковой величине разрядной емкости. В результате этого износ электродов трубки ускорителей на основе ГИН происходит в несколько раз быстрее, чем у аналогичных ускорителей с ДФЛ. Поэтому ускоритель «Аргумент-1000» разрабатывался на основе импульсного трансформатора, заряжающего ДФЛ.

На рисунке 6.1 приведена принципиальная электрическая схема высоковольтного блока ускорителя «Аргумент-1000».

Первичный контур резонансного трансформатора выполнен симметричным и состоит из первичной обмотки с заземленной средней точкой, четырех конденсаторов C1, C2, C3 и C4 и управляемого разрядника FV1. Конденсаторы C1 и C2 подключаются параллельно и заряжаются до +14 кВ, а конденсаторы C3 и C4, так же подключенные параллельно, до -14 кВ.

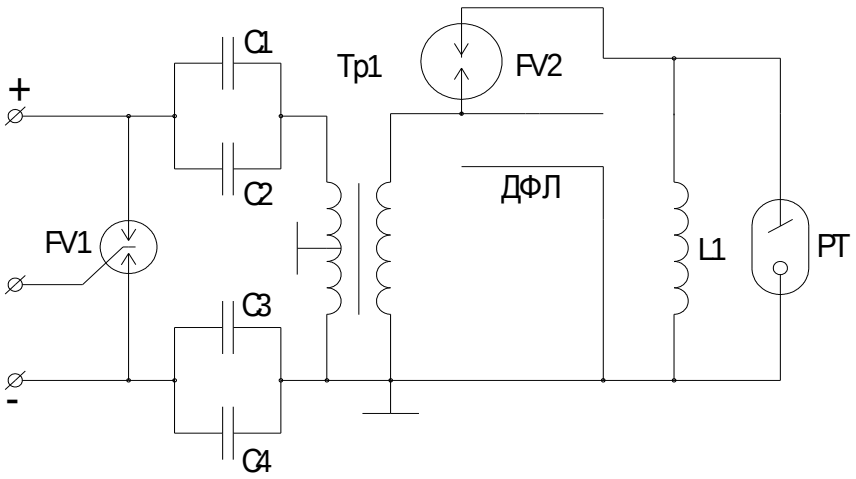
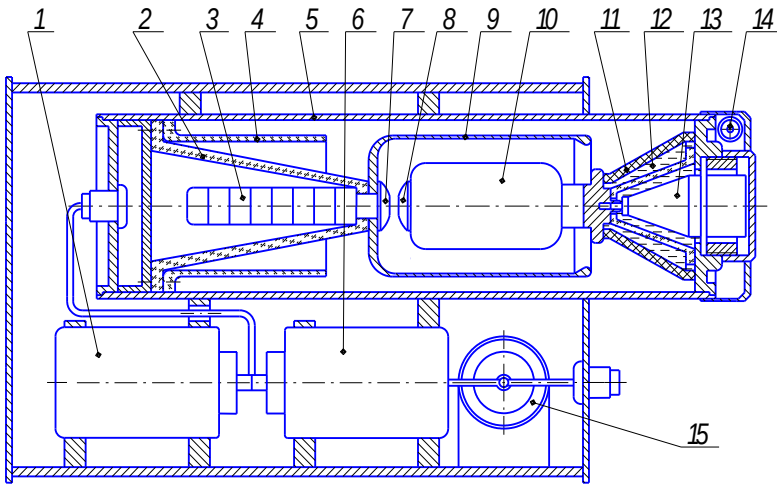


Рисунок 6.1 - Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока ускорителя

Управляемый разрядник – серийно выпускаемый разрядник типа РУ – 65. При подаче на разрядник FV1 пускового импульса, происходит его срабатывание и в обмотках резонансного трансформатора Тр1 возникают электромагнитные колебания. Импульс высокого напряжения во вторичной обмотке трансформатора заряжает ДФЛ до напряжения 1 МВ на второй полуволне электромагнитных колебаний. При этом происходит пробой разрядного промежутка FV2. В результате на электродах ускорительной трубки РТ возникает короткий импульс напряжения и происходит генерирование тормозного излучения.

Пульт управления ускорителя «Аргумент-1000» выполнен в виде двух блоков с размещенными в них стабилизированными источниками положительного и отрицательного напряжения номиналом 14 кВ и устройством автоматики. Источники зарядного напряжения представляют собой ключевые однотактные высокочастотные преобразователи напряжения с умножителями напряжения на выходе. Устройство автоматики обеспечивает плавный заряд первичных накопительных конденсаторов высоковольтного блока, индикацию окончания заряда и блокировку повторного заряда после проведения рабочего запуска ускорителя.

На рисунке 6.2 представлен продольный разрез высоковольтного блока ускорителя «Аргумент-1000». Первичная обмотка поз.4 резонансного трансформатора состоит из двух полуобмоток, так как имеет заземленную среднюю точку. На каждую из полуобмоток, при срабатывании первичного управляемого разрядника поз.15 , разряжаются два параллельно подключенных конденсатора поз.1 и поз.6 типа К-75-48, номиналом 0,22 мкФ.



1,6 – первичный конденсатор,
2 – вторичная обмотка,
3 – сердечник магнитопровода,
4 – первичная обмотка,
5 – корпус,
7, 8 – электрод,
9 – промежуточный кондуктор,
10 – внутренний кондуктор,
11 – проходной изолятор,
12 – отсек ускорительной трубки,
13 – ускорительная трубка,
14 – сильфон.

Рисунок 6.2 - Продольный разрез высоковольтного блока ускорителя

Каждая полуобмотка имеет по 8 витков, выполненных из фольги шириной 200 мм и толщиной 50 мкм.

Межвитковая изоляция состоит из 4 слоев лавсановой ленты толщиной 50 мкм. Вторичная обмотка поз.2 состоит из 660 витков провода ПЭТВ - 2 диаметром 0,32 мм.

Магнитопровод трансформатора поз.3 набирается из ферритовых колец марки 1500НМ3 с наружным диаметром 50 мм. Электрическая емкость сердечника 25 пФ.

ДФЛ образована корпусом высоковольтного блока поз.5, промежуточным поз.9 и внутренним поз.10 кондукторами. ДФЛ имеет следующие параметры: волновое сопротивление наружной линии 20 Ом, электрическая емкость 60 пФ; волновое сопротивление внутренней линии 32 Ом, емкость 40 пФ. Между внутренним и промежуточным кондукторами расположен разрядный промежуток. Зазор между его электродам поз.7,8 составляет 9,5 мм. КПД трансформатора при работе на емкостную нагрузку 125 пФ составляет 62%. Коэффициент трансформации равен 33. Соотношение амплитуд второй и первой полуволн 2,35.

Ресурс трубки ускорителя «Аргумент-1000» не превышает тысячи импульсов. Поэтому для облегчения ее замены, без последующего наполнения излучателя сжатым газом, рентгеновская трубка поз.13 помещена в герметичный отсек поз.12, наполненный трансформаторным маслом.

Отсек отделен от основного газонаполненного объема высоковольтного блока проходным керамическим изолятором поз.11. В качестве температурного компенсатора масла используется сильфон поз.14. Высоковольтный блок предварительно вакуумируется, а затем наполняется смесью газов, состоящей из 30% SF_6 и 70% N_2, под давлением 2,5 МПа.

Параметры ускорителя «Аргумент-1000» представленные в таблице 6.1.

Таблица 6.1 - Параметры ускорителя «Аргумент-1000»

Параметры	Аргумент-1000
Рабочее напряжение, кВ, не менее	1000
Размер фокусного пятна, мм	2,8 – 4
Просвечивающая способность на 1 м по стали за импульс, мм, не менее	30-35
Длительность рентгеновского импульса, нс, не более	2,5
Экспозиционная доза рентгеновского излучения на расстоянии 0,5 м от анода за 1 импульс, мР, не менее	60
Масса высоковольтного блока, кг	50
Масса пульта управления, кг	4

На рисунке 6.3 приведена осциллограмма рентгеновского импульса ускорителя «Аргумент-1000».

Следует отметить, что отказ от использования принципиальной схемы на основе ГИН в пользу ДФЛ, позволил уменьшить размер фокусного пятна рентгеновской трубки примерно в два раза и существенно увеличить ее ресурс. Снижение экспозиционной дозы ускорителя «Аргумент-1000» в 2-3 раза по сравнению с аппаратом «Аргумент» отчасти компенсируется более жестким спектром тормозного излучения. Поэтому просвечивающая способность снижается не значительно. Ускоритель позволяет просвечивать не менее 200 мм преграды типа «сухой песок». При этом длительность рентгеновского импульса уменьшается почти на порядок, а масса высоковольтного блока снижена в три раза.

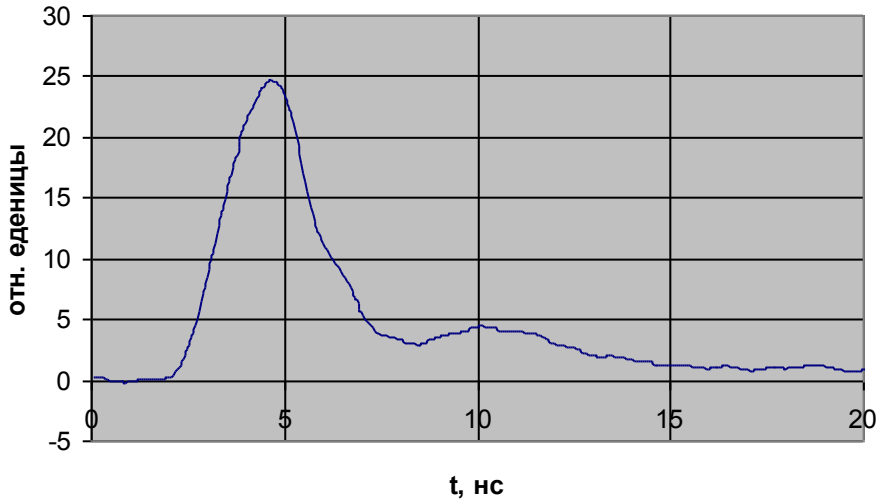


Рисунок 6.3 - Рентгеновский импульс ускорителя «Аргумент-1000»

Ускоритель «Аргумент-1000» позволяет проводить рентгенографирование объектов в воздушной среде при фокусном расстоянии до 8 м.

Внешний вид ускорителя «Аргумент-1000» представлен на рисунке 6.4.

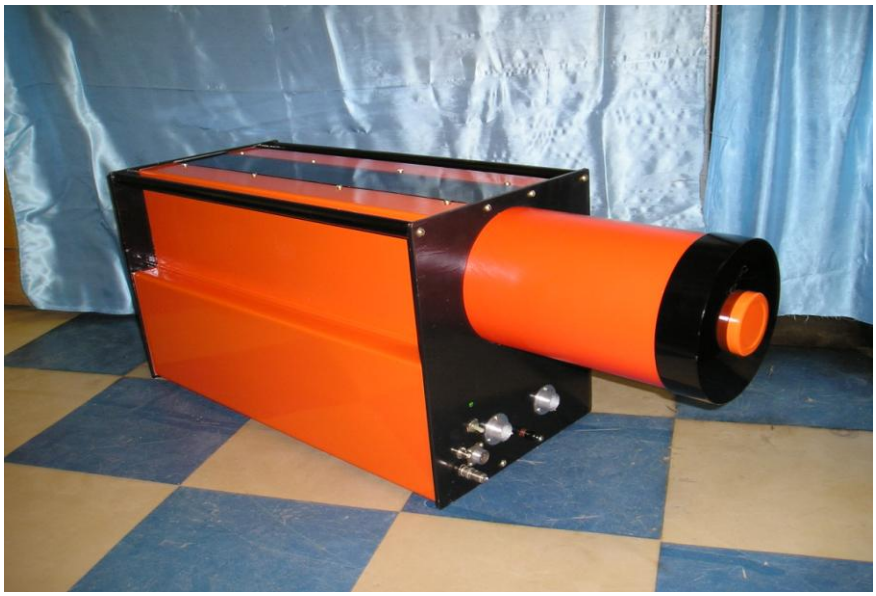


Рисунок 6.4 - Внешний вид ускорителя «Аргумент-1000»

Представленные приборы позволяют получать качественные рентгенограммы исследуемых объектов в однокадровом режиме работы. Однако, при высокоскоростных испытаниях объектов (V $\geq$ 10 км/с), когда их физическое состояние резко изменяется в течение нескольких микросекунд, информации получаемой с помощью одноимпульсной рентгенорегистрации

недостаточно. Желательно на одной рентгенограмме иметь 2, 3 и более теневых изображений объекта через заданные интервалы времени, то есть наблюдать динамику изменения состояния объекта или иметь так называемую «кинорентгенограмму» состояния перемещающегося объекта. Многие известные методы «киноретгенорегистрации», типа импульсного повышения чувствительности рентгеновской пленки, в момент ее облучения [32], рентгеновская электронно-оптическая регистрация [33] и т.п. с получением до шести и более теневых изображений испытываемого объекта не могут быть использованы в экспериментах, так как имеют ограниченную до 200 мм зону регистрации.

К наиболее перспективным и удовлетворяющим требованиям схемы рентгенографирования можно отнести регистрацию с помощью электронно-оптической камеры “Имакон-675” [34,35], камеры “Наногейт” [36,37] и камер системы “Frame-4”, когда теневое изображение объекта с люминофора сцинтиллятора (усиливающего порошкового или монокристаллического экрана) оптически переносится на фотокатод электронно-оптического преобразователя. При этом количество регистрируемых изображений объекта с необходимой дискретностью будет определяться техническими параметрами самих камер. Однако стоимость таких камер составляет от 50 до 150 тысяч долларов и для их использования потребуется разработка принципиально новых ПИРА, работающих в стробоскопическом режиме с частотой в сотни килогерц.

В настоящее время существует реальная возможность получения на базе ПИРА «Сарма-150» 2 - 3 теневых изображений объекта через заданные промежутки времени, но не менее 4 мкс (время инерции послесвечения люминофора сцинтиллятора усиливающего экрана) на одной рентгенограмме. Это достигается путем установки двух–трех ПИРА соответствующим образом и работающих дискретно на одну рентгеновскую пленку. При регистрации по такой схеме: количество аппаратов – количество изображений, определяющую роль играют габариты рентгеновского аппарата. Чем аппараты меньше, тем больше изображений можно получить на одном приемнике, в частности на рентгеновской пленке.

Работы по многокадровой рентгеноскопии проводит ряд зарубежных фирм. В частности, американская фирма Physics Division выпускает аппараты, позволяющие осуществлять рентгенографирование с четырех анодов рентгеновских трубок, расположенных друг за другом и смещенных друг относительно друга в осевом направлении примерно на 6-10 мм [38]. Рентгеноскопия проводится сквозь специальные окна в каждой из трубок. Рентгеновские трубки через высоковольтные кабели запитываются от четырех ГИН.

Но наибольший интерес представляет разработка рентгеновских аппаратов, способных генерировать рентгеновские импульсы непосредственно с одного анода, то есть из одного точечного источника. С помощью рентгенограмм, полученных при использовании таких

аппаратов в комплексе с системой визуализации рентгеновского изображения или рентгеновской пленки, можно наблюдать развитие различных процессов с высокой геометрической точностью.

Первые рентгеновские аппараты с последовательными импульсами с одного анода были разработаны Диксоном, Завалишем и Эрке в 1948г [39]. Это были приборы, работающие с частотой до 200 Гц. Томер и Штенцель [40] в 50-х годах прошлого века создали прибор, частота срабатывания которого достигала 8 кГц. Но напряжение на аноде составляло всего 30 кВ и интенсивность излучения была крайне мала. Разработанные ими позднее рентгеновские аппараты [41] не могли обеспечить время задержки между импульсами менее нескольких десятков микросекунд. Дайк, Барбур и Грундхаузер [42] с помощью трубки с автоэлектронной эмиссией (управляемой трехэлектродной рентгеновской трубки) осуществили повторные разряды через одну трубку путем разряда через нее нескольких генераторов импульсов. Частота срабатывания достигала 10^5 Гц.

Одним из вариантов аппарата с последовательными импульсами с одного анода является прибор на основе управляемой трехэлектродной рентгеновской трубки. Блок – схема такого аппарата представлена на рисунке 6.5. В отличие от аппарата Дайка, на рентгеновскую трубку подаются импульсы от одного генератора. При этом на первичную обмотку импульсного трансформатора высоковольтного генератора должны последовательно коммутироваться несколько первичных конденсаторов. В этом случае минимальное время задержки определяется временем восстановления электрической прочности конструктивных элементов импульсного трансформатор, первичных коммутаторов и рентгеновской трубки.

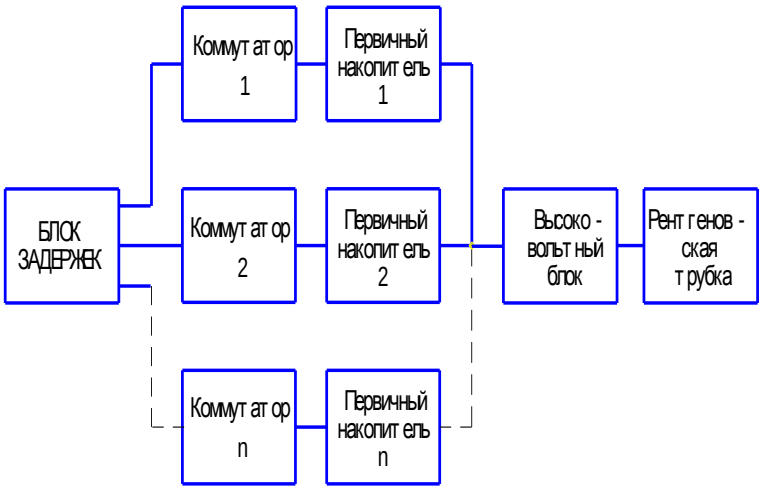


Рис. 6.5 - Блок – схема аппарата

По предварительным экспериментам минимальное время задержки может составлять сотни наносекунд. К недостаткам такой схемы можно в первую очередь отнести большую длительность

рентгеновского импульса, составляющую несколько десятков и даже сотен наносекунд, в зависимости от величины запасаемой вторичной энергии и вида высоковольтного импульсного трансформатора. Поэтому аппараты, создаваемые на основе такой схемы, из-за высокой геометрической нерезкости изображения, могут использоваться только при исследовании БПП со скоростями до 1- 5 км/с. Кроме того, управляемая рентгеновская трубка имеет большие габариты, так как обычно на нее подается достаточно длинный импульс высокого напряжения (от нескольких сотен наносекунд до нескольких микросекунд) и сложна в изготовлении.

Еще один вариант получения минимального времени задержки между рентгеновскими импульсами заключается в следующем. К одной рентгеновской трубке подключаются несколько высоковольтных блоков, генерирующих импульсы напряжения, как и у аппарата Дайка. Но высоковольтный генератор на основе импульсного трансформатора и разрядника-обострителя нагружается на двухэлектродную рентгеновскую трубку диодного типа. В этом случае длительность рентгеновского импульса составляет несколько наносекунд. Высоковольтные блоки срабатывают последовательно. Задержка между импульсами в этом случае определяется временем восстановления электрической прочности трубки и не должна превышать 300…400 нс. Блок – схема аппарата приведена на рисунке 6.6. Аппараты, созданные по этой схеме, могут быть использованы при изучении БПП со скоростями до 20 км/с и более.

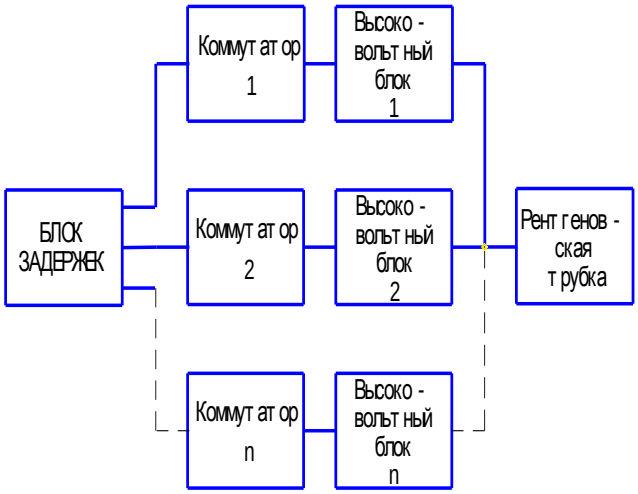


Рис. 6.6 - Блок – схема аппарата

Для проверки высказанных предположений был изготовлен макет аппарата, разработанный в соответствии со вторым рассмотренным вариантом. В качестве двух высоковольтных блоков использовались блоки от аппарата «Сарма-150». На управляющий электрод первичных разрядников подавались поджигающие импульсы с регулируемым временем задержки между

ними. В ходе экспериментов измерялась экспозиционная доза рентгеновского излучения с помощью медицинского клинического дозиметра, оснащенного ионизационной камерой, и форма рентгеновского импульса с помощью полупроводникового датчика СППД – 11 – 04. На основании величины амплитуды рентгеновского импульса можно было судить о влиянии времени задержки на параметры импульса макета.

Первоначально была измерена экспозиционная доза рентгеновского излучения для одной и той же трубки, расположенной непосредственно в каждом высоковольтном блоке. Она оказалась одинаковой у обоих блоков и составляла 14 мР на расстоянии 10 см от анода за импульс. Затем блоки подсоединялись к специальному контейнеру с трубкой. Снова проводилось измерение экспозиционной дозы для определения влияния возросшей индуктивности токоподводов. Для обоих блоков доза составила 13 мР, то есть потери не превысили 7 %. Таким образом, суммарная доза за два последовательных импульса при срабатывании обоих блоков в идеале должна была составлять 26 мР.

При последовательном включении двух блоков с задержкой от 2 до 5 мкс экспозиционная доза за два импульса составляла 21… 22 мР, с задержкой от 500нс до 1мкс 20…21 мР, что на 20% меньше чем идеальная. Предполагая, что доза первого импульса не изменяется, так как его амплитуда на осциллограммах постоянная, получаем снижении дозы второго импульса на 45 %. По осциллограммам рентгеновского импульса было видно, что амплитуда второго импульса падает на 25%. Потери возникают по следующей причине. После срабатывания, разрядник-обостритель в первом блоке долгое время не имеет электрической прочности [16]. Поэтому часть энергии высоковольтного импульса от второго блока, приходящего на рентгеновскую трубку, теряется, так как к аноду оказывается подключенной вторичная емкость первого блока. Эта емкость оказывается паразитной для импульса от второго аппарата.

При включении с задержкой менее 300 нс доза составляла 10…11 мР. Амплитуда первого импульса падала, а второй импульс вообще отсутствовал. Объяснить этот эффект можно следующим образом. Зарядка вторичных накопителей высоковольтных блоков, использовавшихся в экспериментах, осуществлялась от импульсных трансформаторов, работающих на второй полуволне электромагнитных колебаний. Время зарядки накопителей до срабатывания разрядников-обострителей составляло 340 нс. Рассмотрим случай, когда задержка составляет менее 300 нс. В момент прихода на трубку, а, следовательно, на высоковольтный вывод второго блока, высоковольтного импульса от первого блока, корпус разрядника-обострителя второго блока находится под высоким напряжением противоположного знака. Импульс от первого блока инициирует пробой разрядника-обострителя второго блока. На это уходит часть энергии, запасенной в первом блоке, и поэтому доза рентгеновского излучения падает. Второго рентгеновского импульса не генерируется вообще. Таким образом, для уменьшения времени

задержки между рентгеновскими импульсами целесообразно использовать короткопериодные резонансные трансформаторы, позволяющие быстро заряжать вторичные накопители, или трансформаторы, работающие на первой полуволне электромагнитных колебаний.

Для компенсации потерь дозы излучения второго импульса, во втором высоковольтном блоке была увеличена на 40% запасаемая энергия, путем увеличения электрической емкости накопителя и напряжения пробоя разрядника-обострителя. В результате этого суммарная доза при последовательном включении двух блоков с задержкой 0,5 мкс составила 24…25 мР, а амплитуда второго рентгеновского импульса на осциллограммах практически сравнялась с амплитудой первого импульса, но длительность второго импульса увеличилась на 10%.

Следует отметить, что с увеличением времени задержки между импульсами до нескольких микросекунд, потери во втором блоке снижаются.

Эксперименты, проведенные с макетом, подтвердили возможность создания рентгеновского аппарата с серией последовательных импульсов со временем задержки 400…500 нс и более между импульсами с одного анода. При их разработке требуется учитывать, что запасаемая энергия в каждом последующем блоке должна быть больше, чем в предыдущем, а это приводит к некоторому изменению параметров рентгеновского импульса. Для подтверждения этих выводов и разработки образцов рентгеновских аппаратов с двумя и более последовательными импульсами требуется проведение дополнительных экспериментов.

Создание аппаратов, позволяющих получать несколько последовательных рентгеновских импульсов с регулируемой задержкой между ними и генерирующих излучение с одного анода, открывает дополнительные перспективы для исследователей БПП.

Заключение

Описаны переносные импульсные рентгеновские аппараты серий «Сарма» и «Аргумент». Благодаря использованию газовой изоляции в качестве основного диэлектрика высоковольтного блока удалось существенно упростить конструкцию, уменьшить массу и габариты приборов.

Аппараты серий «Сарма» и «Аргумент» широко применяются при проведении различных научных экспериментов.

В данном пособии приведены описание конструкции и основные параметры переносных импульсных рентгеновских аппаратов.

В пособии дано обоснование использования аппаратов серий «Сарма» и «Аргумент» при исследовании быстропротекающих процессов, представлены результаты их применения на испытательном комплексе и отмечены перспективные направления развития рентгенорегистрации.

Список используемых источников

1. Цукерман В.А. Рентгенографирование процессов взрыва и детонации // ДАН. – т. XL. - №7. - 1943.
2. Цукерман В.А., Тарасова Л.В., Лобов С.И. // Успехи физических наук.-1971. - Вып.2 .- с. 319 - 337.
3. Цукерман В.А. Портативные источники рентгеновских лучей // Вестник АН СССР. - №11. – 1971.
4. Зеленский К.Ф., Трошкин И.А., Цукерман В.А. Переносные установки с импульсными трансформаторами для получения коротких рентгеновских вспышек // ПТЭ. - №2. – 1968.
5. Белкин Н.В. Разработка и исследование портативных импульсных рентгеновских аппаратов и их элементов // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук – 1990 - 179с.
6. Месяц Г.А., Иванов С.А., Комяк Н.И., Пеликс Е.А. Мощные наносекундные импульсы рентгеновского излучения. – М.: Энергоатомиздат, - 1982. – 168с.
7. Алтухов А.А., Белкин Н.В. и др. Сильноточный импульсный рентгеновский аппарат «Кавказ-300» для неразрушающего контроля // Дефектоскопия. - 1989. - №11. - с.12 - 17.
11. Авторское свидетельство 360886 СССР, М. Кл. H 01 J 17/18. Газонаполненный разрядник / Э.А.Авилов, Н.В.Белкин.- №1478842/26 -25; Заявлено 17.09.70.
12. Авторское свидетельство 396850 СССР, М. Кл. Н. 05д 1/22 Импульсный рентгеновский аппарат / В.А.Цукерман, Н.В.Белкин и др. - №1711753 / 26-25; Заявлено 09.11.71; Опубл. 29.08.73. Бюлл. №36.-1с.
13. Авторское свидетельство 576838 СССР, М. Кл^2.GO1VS/OO, HOSG 1/08 Источник гамма-квантов для гамма-гамма каротажа/ Н.В.Белкин, А.П.Грумбков и др. - № 2101792 / 25; Заявлено 03.02.75.
14. Белкин Н.В., Грумбков А.П., Колесов В.И. и др. Измерение плотности горных пород в скважинах при помощи генератора гамма-квантов // ДАН. - 1075. - т.224. - №3. - с.569 - 572.
15. Э.А. Авилов, Ф.Н. Балтаков, Н.В. Завьялов, И.М. Канунов, Г.А. Полиенко, В.Т. Пунин, Е.С. Хорошайло, А.Л. Юрьев. Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией // Труды РФЯЦ - ВНИИЭФ, научно-техническое издание, выпуск 5. – 2003. – с.190-195.
16. Бельков Е.П. Восстановление электрической прочности искровых промежутков после протекания больших импульсов тока // Журнал технической физики. - 1971. - Т. 44. - Выпуск 9. - с. 1946 -1951.

19. Заявка 2001118885 (2199167) Газонаполненный разрядник / Э.А.Авилов, Б.А.Воинов, А.Л.Юрьев. Заявлено 06.07.2001г.
23. Полиенко Г.А., Завьялов Н.В., Балтаков Ф.Н., Канунов И.М., Хорошайло Е.С. Переносные импульсные рентгеновские аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент-1000» с газовой изоляцией высоковольтных блоков // Доклад на XVIII международный семинар по ускорителям заряженных частиц. – Украина. – Алушта. – 2003.
26. В.П.Дайк, Ф.М.Коллинз. Последние достижения в применении импульсной рентгенографии для исследований при гиперскоростных скоростях. 1965г.
27. В.В.Клюев. Рентгенотехника. Том №1. М. Машиностроение. 1980 г.
28. ЖН и ПФиК., том №10, выпуск №2, 1965 г., стр.124.
29. С.В.Румянцев. Радиационная дефектоскопия. М. Атомиздат. 1968 г.
32. Г.К.Беляев, А.Д.Ковтун, Н.А.Никонов. Изменение светочувствительности фотографических слоев в электрическом поле. ЖН и ПФиК., том №24, выпуск №4, 1979 г., стр.241 – 244.
34. Дж.Хедланд. Разработка электронно-оптической камеры в Великобритании. Труды 14 Международного конгресса по “Высокоскоростной фотографии и фотонике”. М. 1980 г.
35. М.И.Крутик, В.П.Майоров. Разработка и применение дистанционно управляемых стробируемых электронно-оптических камер серии NANOGATE для сверхскоростной регистрации быстропротекающих процессов. Сборник тезисов, докладов. VII Харитоновские чтения. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005 г.
37. В.П.Майоров, И.М.Семин. Разработка систем высокоскоростной видеосъемки VS–FAST–2 и ее применение для регистрации быстропротекающих процессов. IV Научная конференция Волжского регионального центра РАРАН. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005 г
38. Андерсон Б.Г.,Оро Д.М., Олсон Р.Т., Студебекер Дж.К., Платс Д., «Импульсная рентгеновская система для диагностики в экспериментах по имплозии лайнеров», Тезисы докладов девятой Международной конференции по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, Москва-Ст.-Петербург, 7-14 июля 2002 г., стр.77.
39. Dickson D.C., Zavales C.T., Ehrke L.F., IV Proc. Nat. Electr. Conf. – USA, - 1948. - p298.
40. Tomer G., Stenzel A., IV Int. Kongr. Kurzzeitphotogr. – Koln, Germany, - 1958.
41. Tomer G., Stenzel A., J.SMPTE. - 70, - 1960. - p18.
42. Dyke W.P., Barbour J.P., Grundhauser F.J. VII Int. Kongr. Kurzzeitphotogr. – Zurich, Germany, - 1965.