

Рентгенорегистрация на испытательных стендах

С.И. Герасимов^{1,A,C,D,E}, Д.В. Захаров^{2,A}, А.В. Зубанков^{3,A}, В.А. Кикеев^{4,B,C}, Р.В. Герасимова^{5,D,E},
Г.А. Полиенко^{6,A}, Е.С. Хорошайло^{7,D}, Б.А. Яненко^{8,D}

^AРоссийский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия

^BИнститут проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

^CНижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия

^DСаровский физико-технический институт НИЯУ МИФИ, Саров, Россия

^EНациональный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

¹ ORCID: 0000-0002-6850-0816, s.i.gerasimov@mail.ru

² ORCID: 0000-0002-8168-3397

³ ORCID: 0000-0002-0515-2092

⁴ ORCID: 0000-0002-2375-0803, vkikeev@mail.ru

⁵ ORCID: 0000-0002-2711-3975

⁶ ORCID: 0000-0001-6023-8860

⁷ ORCID: 0000-0002-4467-351X

⁸ ORCID: 0000-0002-2040-2045

Аннотация

Методы исследований с применением проникающих излучений, включая рентгенографический, позволяют визуализировать фазы быстропротекающих процессов и не искажают характеристики исследуемых потоков вещества из-за отсутствия измерительных элементов, взаимодействующих со средой.

В работе представлены основы рентгенорегистрации с использованием мобильных аппаратов для получения визуальной информации об объектах исследования на стендах и установках испытательных комплексов.

Сформулированы основные задачи рентгенографирования в различных экспериментах. Даны краткое описание схемы рентгенографирования и перечень используемой для этих целей рентгеноаппаратуры. Приведен альбом рентгенограмм, полученных при исследованиях на испытательных стендах.

Ключевые слова: импульсный рентгеновский аппарат, рентгенограмма, аэродинамический и аэробаллистический объект, высокоскоростное взаимодействие, рентгенографирование, рентгенорегистрация, легкогазовые и взрывные метательные установки, дефектоскопия.

Введение

На установках и стендах испытательных комплексов проводятся не только испытания объектов, но и их модельная методическая отработка, т.е. исследовательские работы, в которых с помощью импульсной рентгенорегистрации решаются три основных задачи:

- Регистрация аэробаллистических, аэродинамических или проникающих объектов, с целью оценки их угловой ориентации относительно отвеса, состо-

яния внешних обводов, а иногда и внутренней структуры. При этом объект может находиться в воздухе или в каком-либо имитаторе более плотной среды типа: бетон, песок, вода и т.п. Основным требованием, определяющим качество получаемой информации в этих экспериментах, является четкое соблюдение геометрических параметров схемы регистрации. Дополнительно на ряде стендов с помощью поста рентгенорегистрации по двум ортогональным направлениям производится оценка ориентации

объекта в пространстве, т.е. определяются его линейные координаты и углы нутации.

- Регистрация отдельных фаз взаимодействия метаемого объекта с какой-либо преградой, т.е. степени деформации преграды, поля вторичных осколков или взаимное расположение при взрывном метании группы компактных элементов. Как правило, это эксперименты по отработке средств защиты боевых блоков, датчиков на различных макетных сборках из различных композитных материалов. В этих случаях требуется точная, микросекундная привязка импульса рентгеновского излучения к конкретной фазе взаимодействия, что осуществляется с помощью специально разработанных датчиков на базе полупроводниковых структур или фотоэлектронных умножителей с сцинтилляторами.

- Дефектоскопия объектов до эксперимента и после него, т.е. регистрация их внутренней структуры. В таких экспериментах определяющими факторами являются толщина и плотность материала просвечиваемого объекта. Исходя из этих параметров, выбирается тип рентгеновского аппарата с соответствующей энергией излучения [1].

Как правило, на испытательных комплексах реализуется дефектоскопия объектов толщиной до 45 мм стали.

Для реализации выше указанных задач используются различные типы рентгеновских пленок: «RETINA XBM», «PM-B», «KODAK», «FUJI», работающих совместно с усиливающими экранами РЕНЕКС: «ЭУ-И4», «ВП-2А», «УПВ-2» и т. д. При необходимости результаты визуализации могут быть оцифрованы и обработаны на основе соответствующих программ.

1. Схема рентгенографирования

Большинство задач рентгенорегистрации на испытательных комплексах реализуются по классической схеме построения теневого изображения объекта на пленке расходящимся пучком рентгеновского излучения [2], [3]. Отличие от теневой регистрации состоит в том, что основным механизмом построения изображения является поглощение зондирующего излучения, а не рефракция. Данная схема и ее геометрические параметры, определяющие качество изображения объекта на рентгенограмме, представлены на рисунке 1.

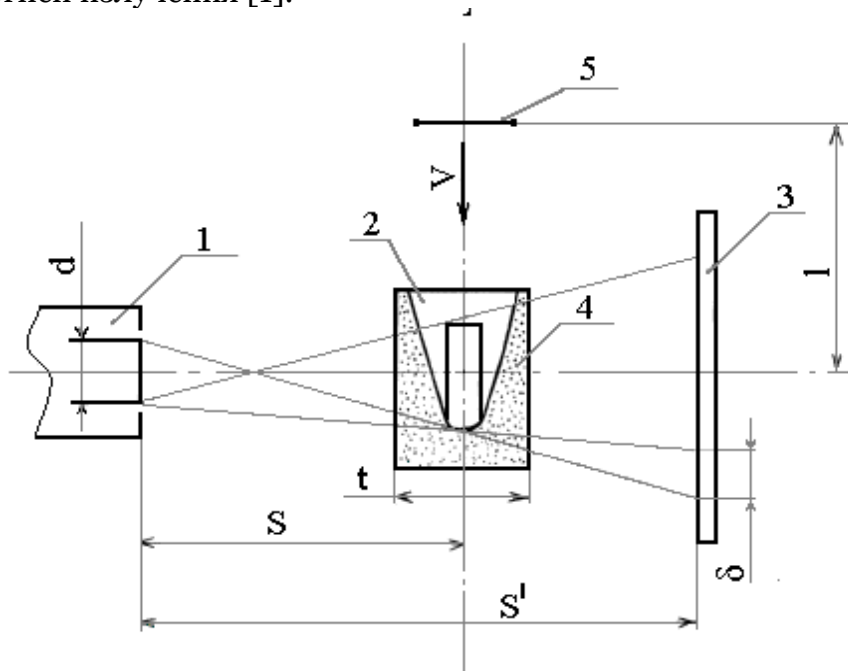


Рисунок 1 – Схема импульсного теневого рентгенографирования: 1–Источник рентгеновского излучения; 2–Объект испытаний; 3–Кассета с рентгенопленкой; 4–Имитатор преграды с $\rho \geq 0.1$ г/см³; 5–Датчик запуска рентгеноаппарата

Объект испытаний поз.2, подлетая к зоне рентгенорегистрации, вызывает срабатывание датчика поз.5, с помощью которого с временной задержкой, равной $t_3=1/V$, запускается рентгеновский аппарат поз.1.

Импульсом рентгеновского излучения на пленке поз.3 строится теневое изображение объекта поз.2, а в экспериментах с проникающими объектами и имитатора преграды поз.4. Данная схема используется и при дефектоскопии с той лишь разницей, что вместо имитатора преграды устанавливается исследуемый объект, а запуск рентгеновского аппарата осуществляется вручную.

Качество такой теневой картины определяется в основном следующими параметрами:

- геометрией схемы: соотношением величин d, δ, S, S' при этом согласно [4] должно выполняться основное условие $S'=(1.2 \div 1.25) \times S$;
- разрешающей способностью системы (усиливающий экран + рентгеновская пленка) и чувствительностью пленки [4], [5];
- длительностью импульса излучения;
- экспозиционной дозой излучения с учетом толщины просвечиваемой среды t и для ее плотности ρ коэффициентом линейного поглощения рентгеновского излучения [4].

Так как эксперименты могут сопровождаться ударными волнами, факелами пламени, осколками и т.п., то защита аппарата поз.1 и кассеты с рентгеновской пленкой поз. 3 осуществляется установкой защитных экранов из различных материалов и варьированием расстояний S и S' [4].

При регистрации объектов по двум ортогональным направлениям используется аналогичная схема, только рентгеновский аппарат имеет две выносные трубки излучения, которые устанавли-

ваются по взаимно-перпендикулярным направлениям. Разновременность срабатывания трубок не превышает $1.5 \cdot 10^{-9}$ с. Общий вид поста для регистрации по двум ортогональным направлениям для пуле-осколочных испытаний представлен на рисунке 2.

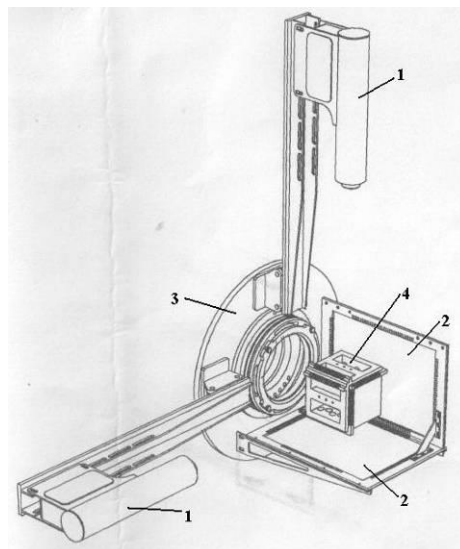


Рисунок 2—Пост рентгенорегистрации по двум ортогональным направлениям: 1 – рентгеновский аппарат «Аргумент-200К»; 2-рентгеновская кассета; 3-узел установки и крепление поста; 4-просвечиваемый объект.

2. Мобильная рентгеноаппаратура на испытательных комплексах

Как показывает практика, для оперативного применения схем регистрации в характерных исследованиях на испытательных стендах достаточно располагать парком импульсных рентгеновских переносных и передвижных аппаратов различной мощности с диапазоном энергией излучения $0.1 \div 1.2$ МэВ.

Типы применяемой на испытательных комплексах рентгеноаппаратуры собственной разработки и ее технические параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1

Технические параметры	Наименование рентгеновских аппаратов										
	Нора	Реис-100	МИРА-3Д	МИРА-4Д	МИН	Кавказ	+) Сарма-150	+) Аргумент-200	+) Аргумент-200К	+) Аргумент-700	Аргумент-1000
Ускоряющее напряжение на аноде рентгеновской трубки, кВ	150	10÷100	200÷250	300÷350	400	500	130÷150	200÷240	120÷150	700÷800	1000÷1200
Диаметр фокусного пятна, мм	2.5÷3	0.1÷1	2.5÷3	2.5÷3	3÷4	4÷5	2÷2.5	1.8÷2.5	1.5÷2.5	1.8÷3.6	4÷6
Экспозиционная доза рентгеновского излучения на контрольном расстоянии, мР/мм	150/ 20	Пост. излучение	40/ 100	70/ 100	50/ 300	70/ 600	50/50	0,8/ 1000	35/ 100	15/ 500	60/ 1000
Длительность рентгеновского импульса не более, нс	12	- « -	15	60	100	100	5÷8	4÷6	2÷5	2÷4	100
Время инерции срабатывания рентгеновского аппарата, мкс	4÷5	- « -	3÷4	10÷12	10÷11	8÷10	4÷5	4÷6	4,2	10÷11	12÷15
Масса рентгеновского аппарата, кг	8	3	12	16	40	120	3	8	12	20	130

+) Данные аппараты имеют газовый изолятор, у остальной аппаратуры изолятором является техническое масло.

Рентгеновские аппараты с ускоряющим напряжением свыше 100 кВ и до 350 кВ используются в основном при регистрации аэробаллистических и аэродинамических объектов в воздухе, т.е. с их помощью решается первая задача рентгенографии на испытательных комплексах.

Рентгеновские аппараты с более высоким ускоряющим напряжением применяются для решения второй и третьей задачи регистрации, т.е. для просвечивания сред с плотностью большей, чем у воздуха, а также и для рентгенографирования в воздухе при взрывных осколочных экспериментах, где требуется варьирование геометрическими параметрами S и S' (см. раздел 1).

Для целей дефектоскопии используется аппарат «Реис-100» с постоянным излучением, а также возможно просвечивание объекта и любым другим аппаратом путём подачи нескольких последовательных импульсов.

Несмотря на принимаемые меры защиты, в течение года 2-4 рентгеновских аппарата из-за повреждений в экспериментах требуют ремонта.

Однако, удовлетворительное качество рентгеноинформации, высокая надежность работоспособности аппаратуры не более 5% отказов в год, делает ее востребованной в большинстве высокоскоростных (1000÷10000 м/с) экспериментов на испытательных стендах.

3. Бесконтактная система запуска рентгенографической аппаратуры

Применение классической схемы запуска (рис.1) требует использования датчика контактного типа. При низкоскоростных испытаниях аппаратура работает достаточно успешно, но при больших скоростях метания возникают затруднения. Использование датчиков контактного типа приводит, например, к разрушению и отклонению метаемого объекта (МО) от заданной траектории, а синхронизация по времени – к потере информации. Отсутствие информации о МО на траектории не позволяет сделать надежных выводов о причинах аварий. Отсюда возникает требование организации бесконтактных высокоточных систем хронографирования для определе-

ния скорости МО время - пролетным способом и регистрации МО на участке свободного полета.

На рис. 3 показан способ запуска регистрирующих систем. В основе способа заложен принцип формирования генерируемых сигналов (прямоугольных импульсов положительной полярности) для запуска регистрирующей аппаратуры с синхронизацией запуска по пути в

заданной координате и измерение скорости МО, в момент пролета его через измерительное сечение (ИС).

Датчик ДПЭ-1 (датчик положения электромагнитный) устанавливался первым (первое ИС), а датчик ДПЭ-2 вторым (второе ИС) по направлению движения МО на измерительном участке.

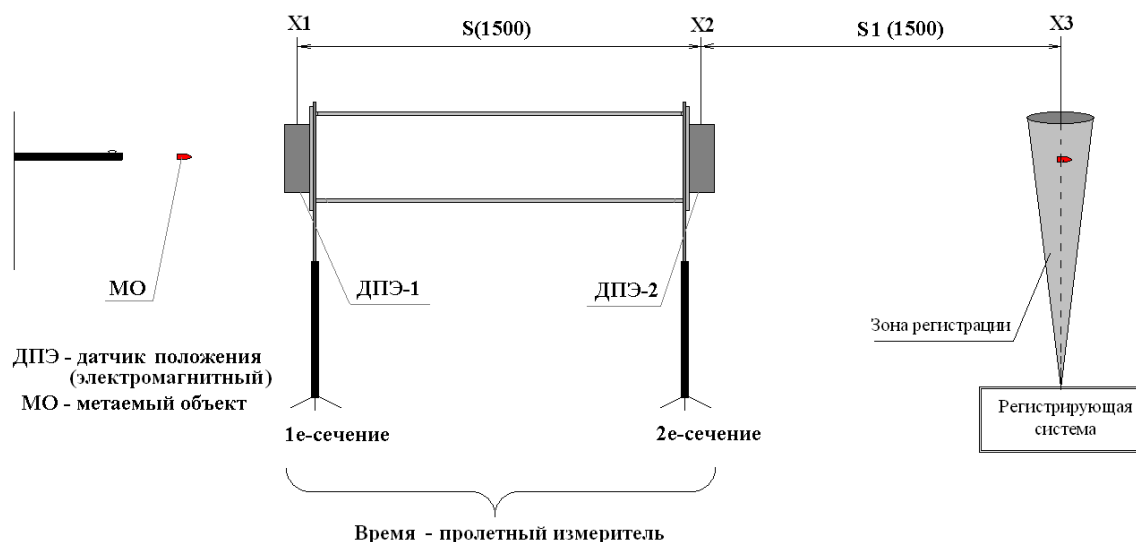


Рис. 3. Способ запуска регистрирующих систем

Время заполнения и считывание информации из счетчика адреса, входящего в состав время - пролетного измерителя скорости (ВПИС), производится с одинаковой частотой, с фиксацией временного интервала, равного сумме Δt_1 (время заполнения счетчика адреса) и Δt_2 (время считывания из счетчика адреса) и выдачи в этот момент исполнительного сигнала на запуск регистрирующей аппаратуры.

Учитывая ответственность факта запуска регистрирующей аппаратуры, синхронизации исполнения команды на запуск регистрирующей аппаратуры, повышенные требования к измерению скорости полета МО, в ВПИС предусмотрена схема блокировки выходных каскадов.

Схема ВПИС состоит из счетного устройства, трех схем согласования, двух формирователей, схемы переключения режима, генератора тактовых импульсов

(8), схемы обнуления, схемы совпадения «И», двух идентичных расширителей импульсов, трех выходных каскадов, адаптера связи с ПЭВМ, дисплея, ПЭВМ. Также в состав входят два полевоспринимающих устройства, схемы запуска и регистрирующие системы.

С приходом сигнала на второй вход схемы совпадения «И», схема вырабатывает управляющий импульс, по временной шкале равный $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, который через схему выходного каскада запускает регистрирующие системы. Это необходимо для обеспечения запуска систем фото-видео регистрации, а также систем рентгенографирования. После этого счетное устройство переходит в режим хранения информации. Схема согласования (15) преобразует сигналы счетного устройства и адаптера связи ПЭВМ. Адаптер связи ПЭВМ осуществляет считывание информации из ячеек памяти счетного устройства в ПЭВМ, с

возможностью редактирования с помощью прикладных программ.

Схема запуска обеспечивает одновременно блокировку счетного устройства (и генератора тактовых импульсов «ГТИ» от несанкционированного начала записи информации, а также синхронизирует работу этих устройств. Тем самым обеспечивается синхронизация запуска по пути в единой временной шкале ВПИС и регистрирующей аппаратуры.

В серии испытаний на баллистических установках подтверждена работоспособность разработанных ИС и устройств, преобразующих сигналы с электромагнитных датчиков в нормированные импульсы, предназначенные для управления системами внешнетраекторного хронографирования параметров МО на участках свободного полета при скоростях метания МО до 7000 м/с.

В качестве метаемой установки использовалась легкогазовая установка. При проведении испытаний использо-

вались алюминиевые МО в виде полнотелых сфер диаметром 6,3 мм.

Регистрация сигналов напряжения с датчиков ДПЭ-1 и ДПЭ-2 (зависимости $U(t)$) осуществлялась с помощью устройства преобразования информации СУПИ73, выполняющего преобразование аналоговых сигналов напряжения в 11-разрядный двоичный код с запоминанием информации во внутренней запоминающей энергонезависимой памяти.

Информация была подвергнута первичной обработке, в результате которой были получены зависимости $U(t)$ сигналов с датчиков ДПЭ.

Определение моментов времени $t_{ЭД-1}$, $t_{ЭД-2}$ проиллюстрировано на осциллограмме зависимости электрических сигналов $U(t)$ с датчиков ДПЭ-1, ДПЭ-2 (рис. 4). За моменты времени $t_{ЭД-1}$, $t_{ЭД-2}$ приняты характерные точки А1, А2 - моменты пересечения положительной полуволны электрического сигнала датчиков ДПЭ-1, ДПЭ-2 нулевого значения напряжения (нулевой линии).

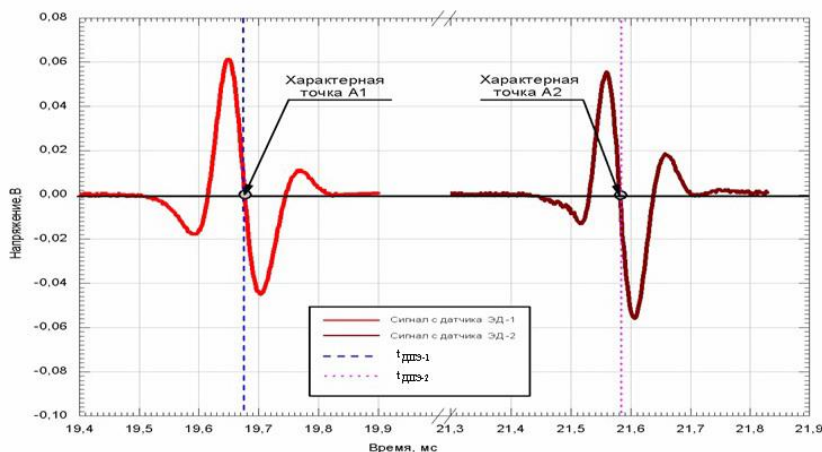


Рис. 4. Зависимости электрических сигналов $U(t)$ с датчиков ДПЭ-1, ДПЭ-2

На рис. 5 и рис. 6 представлены типовая зависимость сигналов с БФС от времени и рентгеновский снимок МО соответственно.

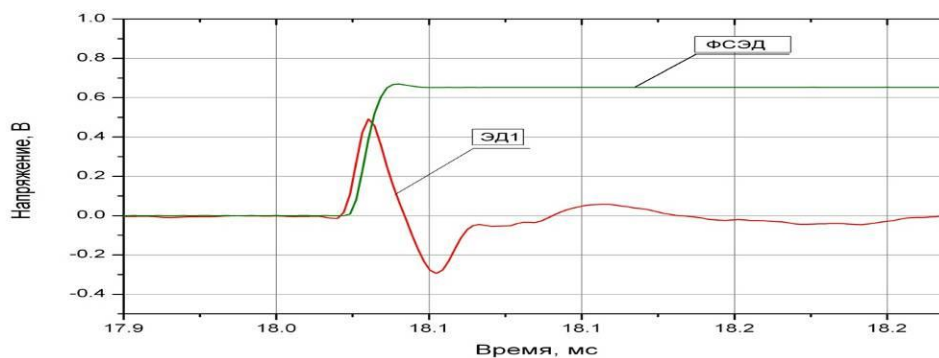


Рис. 5. Типовая зависимость сигналов с БФС от времени: ЭД1 – сигнал с электромагнитного датчика; ФЭСД – формирователь сигнала электромагнитного датчика

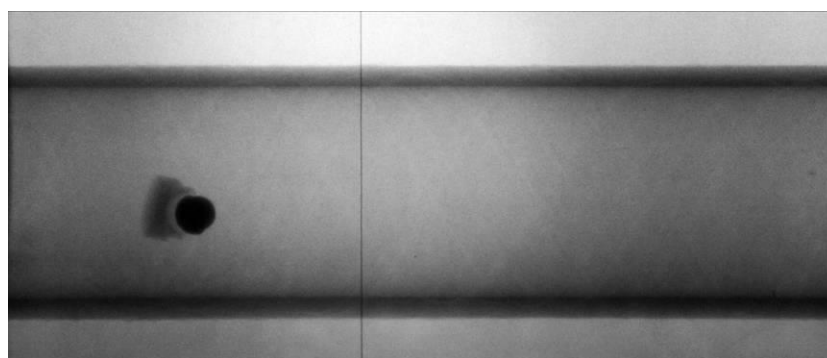


Рисунок 6. Рентгеновский снимок метаемого объекта. Запуск РА осуществлен от ФЭСД. МО – полнотелый сферический объект диаметром $d=6,35$ мм и массой $m=0,4$ г. в поддоне, влетающий на вакуумированный измерительный участок, $V_{MO} = 5600$ м/с

4. Результаты рентгено-регистрации

Ниже представлены характерные рентгенограммы, полученные на испытательных стендах в различных экспериментах. Эта информация предназначена, как правило, для визуального анализа и во многих случаях является решающим фактором в оценке зачетности эксперимента. Вся представленная информация сгруппирована по следующим видам испытаний: аэробаллистические, аэродинамические, высокоскоростные соударения, проникающие объекты и дефектоскопия. К рентгенограммам дана краткая аннотация с указанием: скоростных режимов испытаний, плотностных характеристик просвечиваемых сред, типа и места расположения регистрирующих аппаратов.

На всех последующих рисунках данного раздела рентгенограммы с изобра-

жениями испытываемых объектов приведены в виде негативов.

4.1. Аэробаллистические испытания

На рентгенограммах этого раздела приведена информация по регистрации в экспериментах с метанием объектов из штатного стрелкового оружия и легкогазовых установок. В этих экспериментах в большинстве случаев осуществляется реализация первой задачи рентгено-регистрации на испытательных комплексах.

Так на рисунках 7 и 8 показаны два изображения пули на траектории ее полета при нештатном выстреле, полученные с помощью поста рентгено-регистрации, работающего на базе аппаратов «Аргумент-200К», по двум ортогональным направлениям. Скорость полета пули составляла 700 м/с.

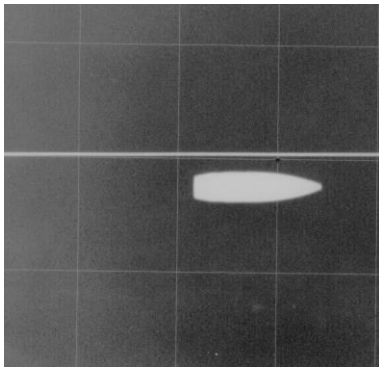


Рисунок 7

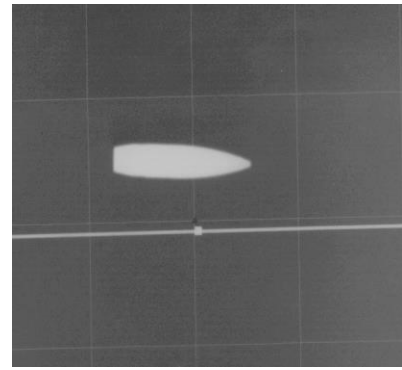


Рисунок 8

Изображение метаемого со скоростью 3150 м/с из легкогазовой установки объекта со специальным наконечником и его угловая ориентация относительно отвеса приведено на рентгенограмме рис. 9. Регистрация осуществлялась с помощью аппарата «МИН».

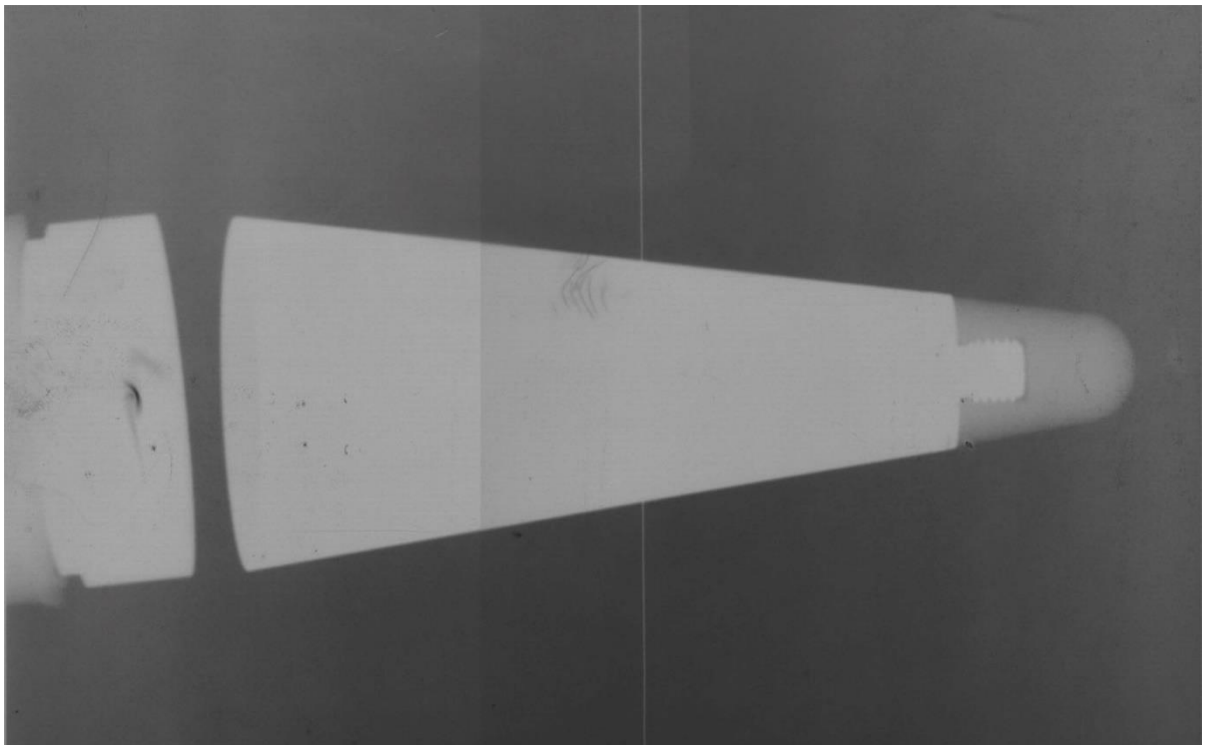


Рисунок 9 - Модель с составным наконечником в полете

На рисунках 10-15 представлена серия рентгенограмм с изображением шарика, метаемого со скоростями 5800÷7000 м/с из легкогазовой установки. Данные эксперименты проводились с целью оценки уноса материала с поверхности шарика. На рентгенограммах рисунков 10 и 11 метаемый алюминиевый шарик разгонялся в воздухе.

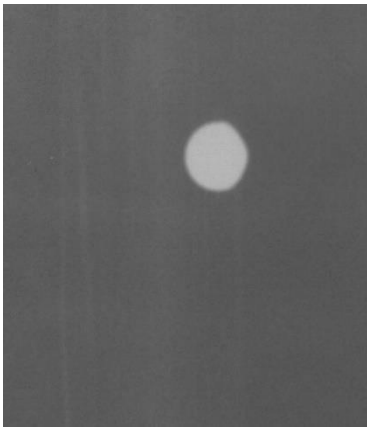


Рисунок 10

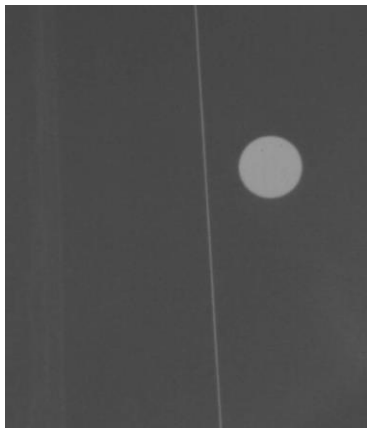


Рисунок 11

Состояние шарика на рисунке 10 соответствует расстоянию 5 м от среза метательной установки, а на рисунке 11 — шарика на расстоянии 10 м.

На рентгенограммах рисунках 12 и 13 аналогичный шарик разгонялся в вакуумной трубе.

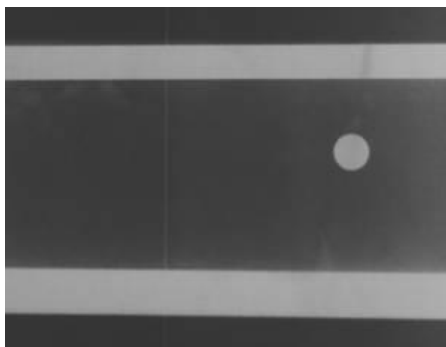


Рисунок 12

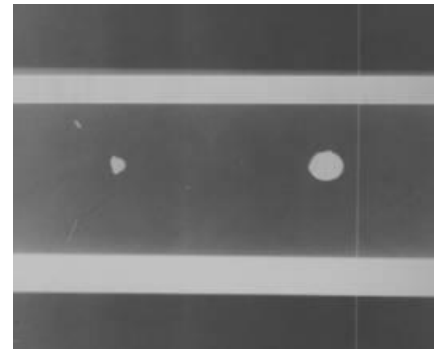


Рисунок 13

На рентгенограммах рис. 14 и 15 шарик из вольфраморениевого сплава разгонялся в воздухе.

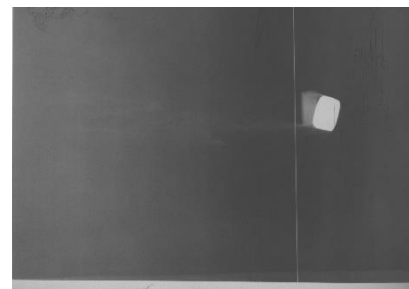


Рисунок 14

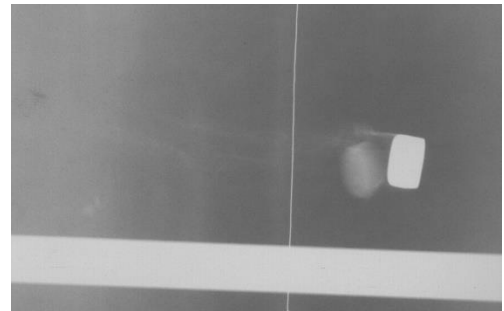


Рисунок 15

Рентгенорегистрация в этих опытах осуществлялась с помощью аппаратов «Нора» и «Сарма-150».

На рентгенограммах рис. 16 и 17 видны фазы процесса не штатного отделения наконечника у аэробаллистической модели при её метании из легкогазовой установки со скоростью 3100 м/с. Регистрация осуществлялась рентгеноаппаратами «Сарма» на расстоянии 4 м (рис.16) и 6 м (рис.17) от среза ствола метательной установки.



Рисунок 16



Рисунок 17

Представленная информация позволяет визуально оценить состояние аэробаллистического объекта на траектории его полёта.

4.2. Аэродинамические испытания

Как правило, в данных испытаниях реализуются первая и вторая задачи рентгенорегистрации на испытательных комплексах. Это рентгенорегистрация в экспериментах с пороховыми, легкогазовыми и взрывными метательными установками.

Состояние и угловая ориентация объекта сложной конфигурации, перемещающегося со скоростью 1500 м/с, на расстоянии 1.2 м от пороховой метательной установки представлена на рентгенограмме рисунка 18. Рентгенорегистрация производилась аппаратом «Сарма-150».

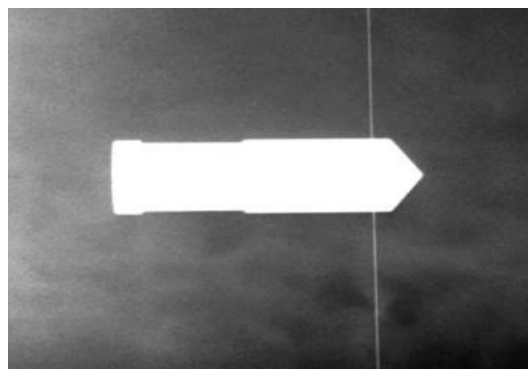


Рисунок 18

Угловая ориентация и целостность аэродинамических сборок: полиэтиленовый цилиндр с алюминиевым и титановым наконечником в виде стакана, перемещающихся со скоростями 4200 и 4800 м/с на расстоянии 3 м от легкогазовой метательной установки, представлены на рентгенограммах рисунок 19(а, б). Информация получена с помощью аппарата «Нора».

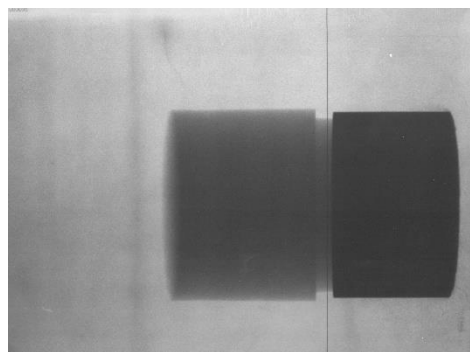


Рисунок 19а



Рисунок 19б

Состояние кумулятивной струи штатного выстрела из гранатомета РПГ-26 после пробития ею датчика запуска, на расстоянии 0.6 м от места срабатывания заряда выстрела представлено на рентгенограмме рис 20.

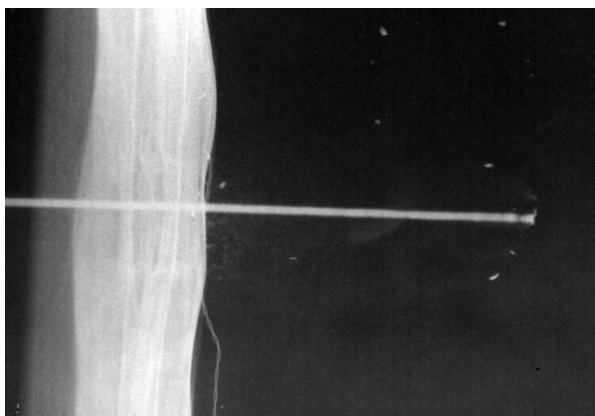


Рисунок 20

Скорость развития струи 8200 м/с. Рентгенорегистрация проводилась аппаратом «Аргумент-700».

Кумулятивная струя, формируемая с помощью заряда ВВ массой 4.5 кг на расстоянии 0.6 м от точки подрыва, представлена на рентгенограмме рис. 21. Скорость развития струи 7800 м/с. Рентгенорегистрация производилась аппаратом «МИРА-4Д».

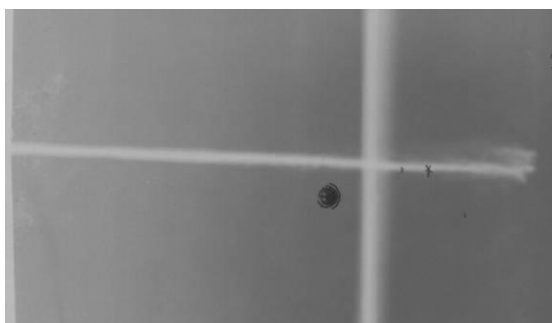


Рисунок 21

На рентгенограмме рис. 22 представлено изображение компактной металлической массы, разгоняемой до скорости 5800 м/с с помощью взрывного разгонного устройства массой 1.5 кг ВВ. Рентгенорегистрация осуществлялась на расстоянии 800 мм от точки подрыва аппаратом «МИРА-3Д».

Взаимное расположение метаемого из легкогазовой установки со скоростью 4400 м/с шара и следующего за ним поддона из полимерного материала, представлено на рентгенограмме рисунка 23. Рентгенограмма получена с помощью аппарата «Нора» на расстоянии 3 м от среза ствола.



Рисунок 22

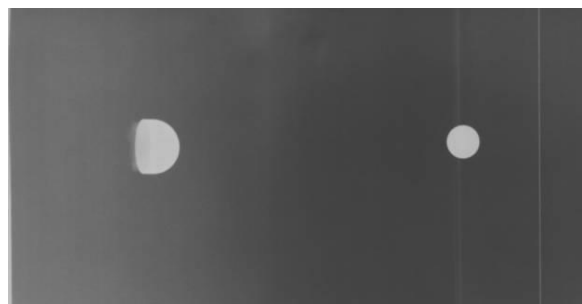


Рисунок 23

4.3. Высокоскоростные соударения

В экспериментах с высокоскоростными соударениями разгоняемых ударников с модельными сборками решается в основном вторая задача импульсной рентгенорегистрации на испытательных комплексах.

Картина пробития пульей испытываемой сборки представлена на рентгенограммах: рисунок 24 – через 50 мкс после соударения; рисунок 25 – через 100 мкс после соударения. Скорость пули 1100 м/с. Регистрация осуществлялась на расстоянии 6 м от точки выстрела. Информация получена с помощью аппарата «Аргумент-700».

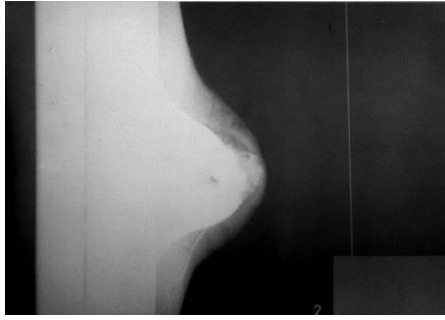


Рисунок 24

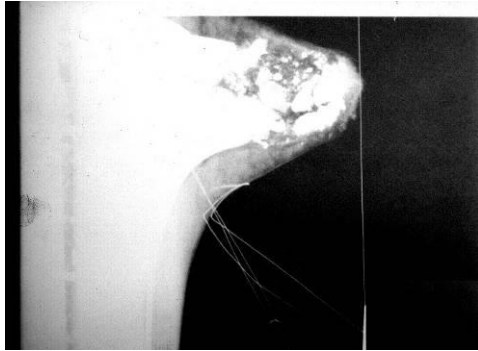


Рисунок 25

Фрагмент пробития пульей макета защитного средства представлен на рентгенограмме рис. 26. Скорость пули 1100 м/с, регистрация на расстоянии 2500 мм от точки выстрела. Информация получена с помощью аппарата «Аргумент-700».

Состояние пули, метаемой из пулемета КПВТ со скоростью 1100 м/с на расстоянии 2.5 м от точки стрельбы, после пробития стальной преграды в момент касания ею пластины из пенопласта, представлено на рентгенограмме рис. 26, регистрация осуществлялась аппаратом «МИРА-3Д». На рис.27 показано пробитие пульей составной преграды.

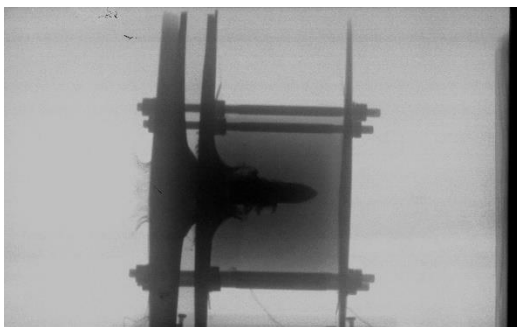


Рисунок 26

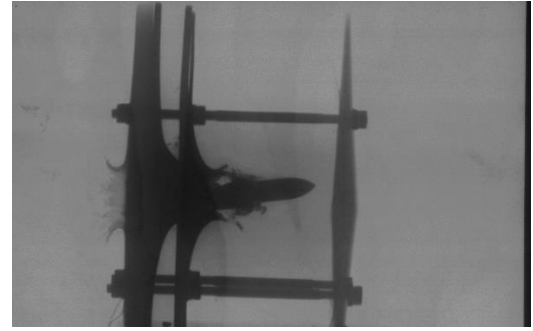


Рисунок 27

На рентгенограммах рис. 28 и 29 представлено состояние светодетонаторов в исходном состоянии и через 10 мкс после их инициирования световой вспышкой. Регистрация осуществлялась аппаратом «МИРА-3Д» на расстоянии 800 мм от детонаторов.



Рисунок 28



Рисунок 29

На рис.28 показаны пять латунных колпачков ($\varnothing=5\text{мм}$, $h=3\text{мм}$), заполненных светочувствительным энергетическим составом. Колпачки установлены на стеклянной поверхности микросекундного газоразрядного излучателя. На рис.29 – состояние сборок через 10 мкс после инициирования разряда. Видно, что состав детонировал во всех сборках и разновременность инициирования мала – картина разрушения колпачков практически идентична.

4.4. Испытания проникающих объектов

При отработке проникающих объектов с помощью рентгеноаппаратуры решается первая задача рентгенорегистрации на испытательных комплексах, т.е. регистрация состояния проникателя

и образуемой им каверны в имитаторах сред типа: песок, лед, вода и т.п.

Начальная фаза проникающего объекта при его внедрении в песчаную преграду с плотностью 1.2–1.6 г/см³ и толщиной 180 мм представлена на рентгенограмме рис. 30. Скорость объекта в данный момент составляла 1200 м/с. Регистрация осуществлялась в 6 м от пороховой метательной установки аппаратом «Кавказ».

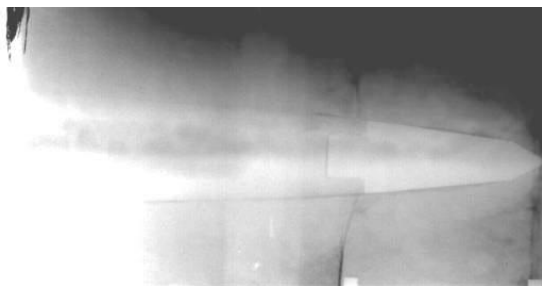


Рисунок 30

Состояние проникающих объектов в момент замыкания ими контактного датчика в имитаторе среды «влажный песок» с плотностью 1.6-1.9 г/см³ и толщиной 100, 120 мм представлено на рентгенограммах рисунков 31 и 32 соответственно. Скорость проникателя в обоих случаях составляла 1000 м/с. Регистрация проводилась аппаратом «Кавказ» на расстоянии 0.8 м от легкогазовой метательной установки.

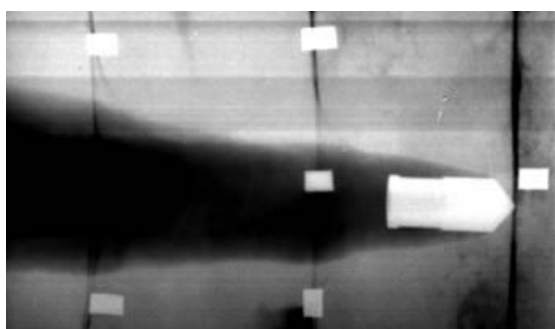


Рисунок 31

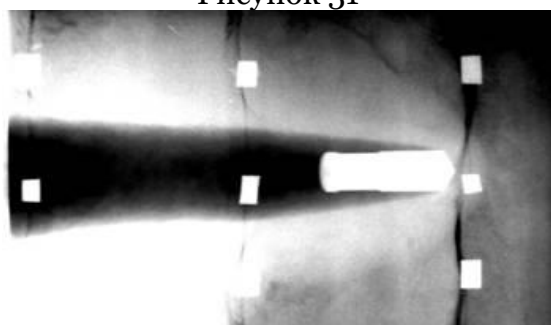


Рисунок 32

Изображение проникающего объекта при прохождении им границы раздела имитатора среды «лёд-вода» плотностью 0.8-1 г/см³ и образуемая во льду каверна представлены на рентгенограмме рисунок 33. Скорость объекта 1200 м/с, толщина имитатора преграды 170 мм. Регистрация проводилась аппаратом «Кавказ» на расстоянии 1200 мм от метательной установки.

На рентгенограмме рисунок 34 представлен момент прохождения метаемой преградой неподвижного удлиненного объекта с датчиками перегрузок через 440 мкс после их взаимодействия. Метаемая преграда представляла собой цилиндр из полипропилена плотностью 1.6 г/см³, диаметром 100 мм и длиной 320 мм. Скорость преграды составляла 1000 м/с. Регистрация осуществлялась аппаратом «Кавказ» в 800 мм от легкогазовой метательной установки.

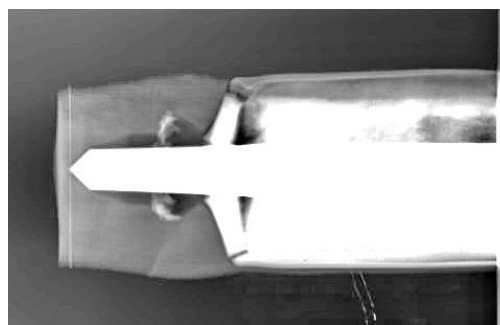


Рисунок 33

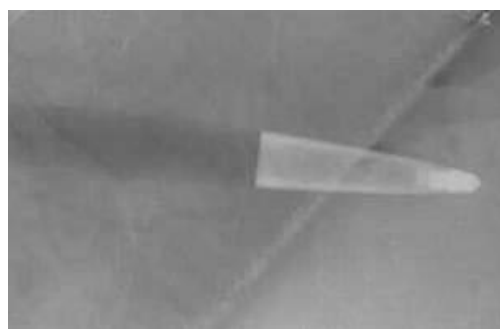


Рисунок 34

Заключение

Качество информации, получаемой с помощью импульсной рентгенорегистрации на испытательных комплексах, дает возможность визуальной оценки состояния испытываемого объекта, конфигурации элементов, непрозрач-

ных для рентгеновского излучения, определенной фазы развития процесса, при скоростях испытаний 8000 м/с и более.

Имеющийся состав рентгеноаппаратуры с диапазоном энергии излучения 0.1÷1.2 МэВ позволяет решать большинство задач аэробаллистических, аэродинамических испытаний, а также процессов высокоскоростного взаимодействия твердых тел и проникания объектов в среды различной плотности толщиной до 200 мм.

Во многих экспериментах рентгеноинформация является проверкой технических решений, а также служит для верификации инженерных и численных методик, используемых при проектировании боевых частей.

Основным критерием применимости рентгенорегистрации на испытательных комплексах являются малая длительность импульса рентгеновского излучения (5÷10)·10⁻⁹с, практически исключающая размазывание в изображении высокоскоростного объекта, и высокая проникающая способность, дающая возможность получения визуальной информации в оптически не прозрачных средах. Полученные в экспериментах рентгенограммы позволяют в конкретный момент времени наблюдать состояние объекта или фазу процесса с экспозицией не более 100 нс - меньше характерных времен исследуемых быстротекущих процессов.

Правильный выбор параметров схемы рентгенографирования дает возможность получения контрастных с небольшим увеличением (1.1^x÷1.3^x) изображений испытываемых объектов. Однако в опытах с проникающими объектами и при дефектоскопии, где просвечиваемые среды являются источником дополнительного рассеивания рентгеновского излучения, а регистрация осуществляется в широком пучке (минимальные размеры рентгеновской пленки 30х40 см²), четкость и контрастность картины теневого изображения объекта снижаются.

Следует также отметить, что рентгеноаппаратура, работающая на газовом

изоляторе (смесь N₂ и SF₆), в отличие от аппаратов с масляной изоляцией (трансформаторное масло Т-750 ГОСТ 982-80) имеет лучшие эксплуатационные характеристики. Малый вес, отсутствие утечки масла у этих аппаратов позволяют устанавливать их под любым ракурсом к испытываемому объекту.

Проблемным остается способ защиты и сохранения рентгеноинформации в эксперименте. Несмотря на ряд имеющихся конструкций, варьирование геометрическими параметрами схемы регистрации, защита рентгенокассет от ударных волн, факелов пламени, осколков и т.п., подбирается для каждого эксперимента отдельно.

Основным недостатком рентгенорегистрации на испытательных комплексах является отсутствие возможности получения серии рентгенограмм одного и того же объекта или фаз процесса с различной временной дискретностью от одного источника излучения, т.е. отсутствие «кинорентгенорегистрации».

На данный период эта проблема может быть решена только путем набора соответствующего количества (как правило не более 3-х штук) рентгеновских аппаратов со специальными экранирующими и коллимирующими элементами.

Высокое качество исходно полученных на пленку рентгенограмм позволяет провести оцифровку и последующий переход на цифровые технологии в хранении, обработке и анализе изображений.

Несмотря на проблемы и недостатки импульсной рентгенорегистрации на испытательных комплексах, она по-прежнему остается востребованной в современных экспериментах.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №17-08-01096.

Литература

1. С.П. Вавилов. Импульсная рентгеновская техника. М. Энергия, 1981-120с.
2. В.П. Дайк, Ф.М. Коллинз. Последние достижения в примене-

- нии импульсной рентгенографии для исследований при гиперскоростных скоростях. 1965. М. Машиностроение – с 170-173.
3. Гомер Г. Рентгеноимпульсная техника – В кн. Физика быстропротекающих процессов: Пер. с англ./Под ред. Н.А. Златина – М, МИР, 1971, т.1, с 336-381.
 4. В.В. Ключев. Рентготехника. Справочник. Том № 1 М. Машиностроение 1980 г.
 5. С.В. Румянцев. Критерии схем теневой рентгенографической регистрации/ Радиционная дефектоскопия, М. Атомиздат, 1968 . С 210-216.
 6. 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.