

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На правах рукописи*

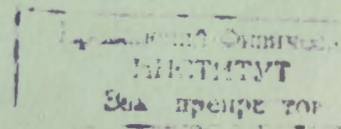
ЛИФАНОВ Михаил Николаевич

Автоматизация ядерно-физических измерений  
при производстве специальной радиационно-защитной  
одежды для пожарных на АЭС

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной  
физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

*На правах рукописи*

ЛИФАНОВ Михаил Николаевич

Автоматизация ядерно-физических измерений  
при производстве специальной радиационно-защитной  
одежды для пожарных на АЭС

Специальность 01.04.01 – приборы и методы экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2005

Работа выполнена в Лаборатории атомного ядра  
Института ядерных исследований РАН.

Научный руководитель –  
доктор технических наук  
Бенецкий Борис Алексеевич

Официальные оппоненты:  
доктор технических наук  
Андреев Анатолий Васильевич (ФГУП ВНИИА)  
кандидат физико-математических наук  
Кузнецова Евгения Васильевна (ИЯИ РАН)

Ведущая организация –  
Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН

Защита диссертации состоится **23.06.2005** 2005 г. в 15 часов  
на заседании диссертационного совета Д 002.119.01 Института ядерных  
исследований РАН по адресу:

117312, Москва, проспект 60-летия Октября, д. 7а

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института ядерных исследований РАН

Автореферат разослан "**20.05.2005**" 2005 г.

Учёный секретарь Диссертационного совета  
кандидат физико-математических наук

Б.А. Тулупов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Данная работа пополняет список тех исследований, которые направлены на минимизацию риска для жизни и здоровья персонала, занятого ликвидацией последствий аварии на ядерных объектах.

Анализ данных медицинской статистики, в том числе по лечению моряков атомной подводной лодки К-19 (1961), пожарных Чернобыльской АЭС (1986) показал, что острая лучевая болезнь протекает намного легче, если дополнить существующие средства индивидуальной защиты (СИЗ) одеждой из материала, в состав которого включены добавки из тяжёлых металлов<sup>1</sup>. Расчёты и испытания показали, что одежда изолирующего типа с экранирующим эффектом защищает от бета-лучей, а как средство, дополняющее фактор времени, защищает также и от высоко поглощаемого компонента гамма-излучения (энергии до 200 кэВ). При общей поверхностной плотности композиционного материала (КМ) 1 г/см<sup>2</sup>, по содержанию свинца – 0,5 г/см<sup>2</sup> вес СИЗ составит около 20 кг. Такая одежда в условиях радиоактивного загрязнения типа чернобыльского предотвращает лучевой ожог, снижает дозу проникающего облучения примерно в два раза, а степень поражения снижает на единицу. При аварийном неконтролируемом повышенном облучении она может оказаться единственным средством спасения жизни людей. Новая концепция защиты от излучений, характерных для ядерной аварии, была реализована при создании специальной защитной одежды типа СЗО-1, предназначенной для пожарных, охраняющих АЭС.

### Актуальность темы

Спецодежда имеет радиационно-защитные свойства (РЗС), т.е. качество, которое представляет новизну для швейного производства. Серийный выпуск СЗО-1 был невозможен без осуществления непосредственно на швейном производстве входного, промежуточного и выходного контроля РЗС материалов и изделий. Необходимость создания такого контроля и определяет **актуальность** данной работы.

### Цель работы:

создать и внедрить автоматизированный измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) для осуществления входного, промежуточного и выходного контроля радиационно-защитных свойств КМ и изделий в условиях малосерийного производства специальной защитной одежды пожарных СЗО-1

<sup>1</sup> Гогин Е.Е., Емельяненко В.М., Бенецкий Б.А., Филатов В.Н. Сочетанные радиационные поражения. М.: Известия, 2000.

(ТУ 17-09-14-353-91), основанного на неразрушающем радиационном методе. При этом 1) контроль должен быть безопасным для оператора и производственной среды, 2) измерительная аппаратура – отечественного серийного производства для обеспечения выпуска сертифицированной продукции, 3) управление – адаптировано к эксплуатации персоналом, не имеющим специального образования.

Для достижения поставленной цели было необходимо:

- 1) установить параметр для оценки радиационно-защитных свойств КМ;
- 2) разработать методику безопасных измерений с использованием гамма-излучения;
- 3) создать технические средства измерения (аппаратную часть, программное обеспечение, эксплуатационно-техническую документацию);
- 4) определить источники погрешностей и меры по их нейтрализации;
- 5) разработать алгоритм автоматизированных измерений РЗС.

В ходе разработки применялись следующие методы исследования:

- 1) анализ: радиационного метода контроля качества продукции, методов автоматизации физического эксперимента, опыта использования вычислительной техники в физическом эксперименте;
- 2) синтез ИВК с учётом критерия: "точность измерения – безопасность – простота обслуживания";
- 3) эксперимент для проверки взаимодействия элементов ИВК при эксплуатации в производственных условиях персоналом, не имеющим специального образования.

### Новизна

В производстве КМ и защитной одежды данная разработка не имеет аналогов. Её новизну составляют пять факторов:

1. Впервые в систему испытаний на швейном производстве внедрён неразрушающий радиационный метод контроля радиационно-защитных свойств новых свинецсодержащих композиционных материалов и изготавливаемой из них спецодежды пожарных, охраняющих АЭС.
2. Установлен параметр для оценки радиационно-защитных свойств данных материалов и изделий. Таким параметром служит коэффициент ослабления потока моноэнергетического гамма-излучения изотопа кобальт-57 с энергией 122 кэВ ( $k_{122}$ ).
3. Для точечного просвечивания материалов использовано гамма-излучение особо слабой интенсивности, получаемое от образцовых

спектрометрических гамма-источников (ОСГИ), предназначенных для калибровки аппаратуры. Активность ОСГИ менее 100 кБк. Это значение на порядок меньше минимальной значимой активности источника на рабочем месте (МЗА) по действующим Нормам радиационной безопасности (НРБ-99, приложение П-4, с. 102). Вклад в мощность дозы на расстоянии 0,5 метра от такого источника ниже естественного фона. Это позволяет оборудовать участок контроля в помещении без специальной защиты и избежать значительных расходов на организационные и технические мероприятия по защите персонала и производственной среды от радиации.

4. Адаптирован к применению в швейном производстве сцинтилляционный гамма-спектрометр для измерения коэффициента ослабления ( $k_{122}$ ) с точностью 1,5 – 3% с помощью вычислительной техники, специальной методики и оригинального программного обеспечения, разработанного под задачу.

5. Новизна состоит также в доступности для неспециалистов ядерно-физических методов измерений, использовавшихся ранее профессионалами-физиками.

### Практическая ценность

I. Разработка ИВК привела к созданию на швейном производстве автоматизированного рабочего места для контроля РЗС. Следует подчеркнуть, что данная разработка, в которой используется гамма-излучение, отличается безопасностью при одновременно высокой точности измерения. Это стало возможным благодаря специальной методике, предусматривающей использование источника слабой активности в сочетании с эффективным детектором и аппаратурой достаточно высокого разрешения. Таковыми служат ОСГИ, сцинтилляционный счётчик и гамма-спектрометр, работу которого поддерживает мини-ЭВМ. Последняя позволяет автоматизировать измерения, связанные с регистрацией сравнительно малых потоков излучений в режиме реального времени с последующей автоматизированной обработкой массивов данных по формулам математической статистики.

II. В результате развития опытного производства, включающего участок контроля РЗС материалов и изделий, с 1993 г. пожарные службы АЭС в России стали оснащаться специальной защитной одеждой типа СЗО-1, предназначенной для работы при авариях на АЭС.

III. Параметры защиты, полученные в результате исследований, вошли в "Специальные требования для специальной защитной одежды изолирующего типа, используемой при выполнении работ, связанных с тушением пожаров и

ликвидацией аварий на АЭС и других радиационно-опасных объектах" (Нормы пожарной безопасности НПБ-162-2002, п. 9.2.2).

IV. ИВК, обеспечивающий контроль с применением безопасных ОСГИ, может использоваться при испытаниях других материалов.

V. Отдельные компоненты автоматизации ИВК (принцип формирования ряда файлов, обеспечивающий сохранность данных в случае аппаратных сбоев; автоматическая нумерация первичных данных, позволяющая автоматизировать последующие расчёты) могут быть использованы при автоматизации других исследований.

#### Реализация результатов

Измерительно-вычислительный комплекс по контролю радиационно-защитных свойств КМ и изделий при производстве защитной одежды пожарных, охраняющих АЭС, установлен на испытательном участке дочернего государственного предприятия "Защитная одежда" при НИИТМ в 1995 г., о чём имеется акт о внедрении.

#### Апробация результатов

Результаты работы докладывались на научно-практических конференциях "Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений" в ИЯИ РАН (Москва, 1999 г.) и в Медицинском центре Управления делами Президента РФ (Москва, 2000 г.), а также обсуждались на семинарах в Гос. ин-те физико-технических проблем РАН, ИЯИ РАН. По теме диссертации опубликовано 6 работ.

#### На защиту выносятся:

- Применение радиационного неразрушающего метода контроля в новой сфере – производстве специальной радиационно-защитной одежды пожарных, охраняющих АЭС.
- Установленный параметр для оценки РЗС данных материалов и изделий – коэффициент ослабления потока моноэнергетического гамма-излучения изотопа кобальт-57 с энергией 122 кэВ ( $k_{122}$ ).
- Методика безопасного контроля РЗС с использованием ОСГИ.
- ИВК, обеспечивающий автоматизированный контроль РЗС по данной методике.
- Автоматизированное рабочее место на основе данного ИВК, предназначенное для малосерийного швейного производства.

#### Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения, изложенных на 127 страницах; содержит 25 рисунков, 7 таблиц, список литературы из 64 наименований, а также 6 приложений, представленных на 65 страницах.

\*\*\*

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** сформулированы основные положения: актуальность, цель и задачи работы, методы исследования, новизна, практическая ценность, реализация и апробация результатов, структура работы.

В **первой главе** изложена история вопроса, рассматриваются способы определения радиационно-защитных и других характеристик материалов с помощью неразрушающего радиационного метода. Анализируются способы контроля, осуществляемого путём просвечивания объекта ионизирующим излучением, имеющим ту же природу, что и излучение, вредное воздействие которого должен ослабить испытываемый материал. Обсуждаются преимущества и недостатки различных измерительных систем в случае их использования на производстве для контроля РЗС тонких экранирующих материалов и спецодежды пожарных. Дан обзор опубликованных работ по следующим вопросам:

1. Метод неразрушающего радиационного контроля, его свойства, система "источник-детектор"; радиометрический способ детектирования, позволяющий автоматизировать измерения благодаря преобразованию энергии излучения в электрические сигналы.
2. Опыт использования гамма- и рентгеновского излучений для оценки эффективности радиационной защиты, для толщинометрии, плотнометрии, а также в области биологической дозиметрии.
3. Радиоизотопный способ контроля, наиболее полно отвечающий критерию "точность-безопасность"; источники излучения, способы детектирования, преобразование сигнала в цифровую форму; регистрация энергетического спектра гамма-излучения, прошедшего через контролируемый объект; характеристики контролируемого объекта, измерение которых обеспечивает радиоизотопный способ.
4. Аппаратура ядерной электроники в схеме ядерного сцинтилляционного гамма-спектрометра.
5. Опыт автоматизации ядерно-физического эксперимента и обработки результатов измерений с помощью ЭВМ.

6. Опыт использования измерительно-вычислительного комплекса, состоящего из серийной ядерной электроники отечественного производства, мини-ЭВМ (включая программное обеспечение), а также персонального компьютера.

Главу заключает вывод о необходимости синтеза специальной системы контроля и сертификации радиационно-защитных свойств КМ, поскольку ни одна из рассмотренных систем не решает поставленную задачу в полной мере.

Во **второй главе** рассматриваются физические основы контроля РЗС КМ, производимого с помощью неразрушающего радиационного метода. Параметр для оценки РЗС — коэффициент ослабления ( $k_{122}$ ) — установлен с учётом следующих факторов:

1. Характеристик радиационных полей: а) в аварийных ситуациях в Виндскейле (1957), Тримайл Айленде (1979), Чернобыле (1986); б) по трудам Радиового института АН СССР; в) по американским материалам об испытаниях и применения ядерного оружия и данным японо-американского Фонда Хиросимы; г) по результатам исследований ИЯИ РАН. Спектр энергий фотонных излучений или дозовых спектров при возникновении ядерной аварии простирается от единиц до 2200 кэВ. Мягкий компонент, который может быть существенно ослаблен защитным материалом, имеет эффективную энергию около 100 – 136 кэВ. Установлено ограничение в использовании костюма для защиты от жёсткого компонента (эффективная энергия 740 – 800 кэВ); по этой причине меры по его экранированию не рассматриваются; единственным фактором защиты от жёсткого компонента остаётся время.

2. Результатов испытаний образцов КМ с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, биологической дозиметрии в лабораторных условиях, а также в условиях полигона на ЧАЭС в 1987 г. с помощью физической дозиметрии. Данные, полученные разными лабораторными методами, совпадают с данными натурных испытаний в Чернобыле; в целом они совпадают с итогами расчётов, изложенных выше в п. 1.

3. Фактора накопления – источника погрешности от воздействия на детектор вторичного и рассеянного излучений и способа устранения этой погрешности путём просвечивания материала гамма-излучением, имеющим дискретный спектр в отличие от непрерывного рентгеновского, и наблюдения за ослаблением излучения в области гамма-пика.

4. Закона ослабления излучения, проникающего через вещество в геометрии узкого моноэнергетического пучка:

$$N_o = N_u e^{-\mu d}, \quad (1)$$

где  $N_u$  – число частиц от источника излучения, упавших на материал в течение фиксированного времени;  $N_o$  – число частиц ослабленного излучения, прошедших через материал за то же время;  $\mu$  – массовый коэффициент ослабления;  $d$  – поверхностная плотность материала. Измерения  $N_u$  и  $N_o$  при неизменной геометрии системы "источник-детектор" позволяют оценить экранирующие свойства материала с помощью коэффициента ослабления ( $k$ ), который определяется следующими соотношениями:

$$k = N_u / N_o, \quad k = e^{\mu d}. \quad (2)$$

5. Зависимости  $\mu$  от эффективного атомного номера вещества ( $Z$ ) и энергии фотонного излучения ( $E$ ), выраженной формулой:

$$\mu = \text{const} \times (Z^5 / E^v), \quad (3)$$

где  $\text{const}$  – коэффициент пропорциональности;  $v$  – постоянная материала в ограниченном интервале энергий  $E < 1$  МэВ. Из формулы (3) следует, что для эффективного поглощения фотонов материал должен содержать атомы тяжелых металлов; в силу относительной дешевизны наиболее широко используется свинец.

6. Свойств коэффициента ослабления, который: а) измеряется косвенно на основе прямых измерений  $N_u$  и  $N_o$ ; б) не зависит от интенсивности излучения; в) является относительной величиной, что даёт возможность исключить калибровку аппаратуры с помощью образцовых мер.

7. Следствия, вытекающего из п. 6б: в испытательной лаборатории не требуется имитировать условия повышенной радиации, при которых применяется защитная одежда; материал просвечивается с помощью безопасного ОСГИ; в условиях применения слабого источника с учётом влияния гамма-квантов фона коэффициент ослабления, измеренный в  $n$ -ой точке объекта ( $k_n$ ), вычисляется по формуле:

$$k_n = (N_u - N_{\phi}) / (N_{on} - N_{\phi}), \quad (4)$$

где  $N_{\phi}$  – число гамма-квантов фона измеряется в отсутствие источника и контролируемого объекта в течение фиксированного времени.

8. Погрешности от нелинейности  $k = \exp(\mu d)$ , для минимизации которой необходим подбор гамма-излучения с энергией, соответствующей ожидаемым свойствам объекта контроля, чтобы значения  $k$  находились между двойкой и тройкой. В нашем случае содержание свинца в КМ, используемом для

изготовления спецодежды, составляет от 0,1 до 0,3 г/см<sup>2</sup>, в защитных слоях костюма – от 0,2 до 0,5 г/см<sup>2</sup>.

9. Наконец, ограниченного числа изотопов, излучающих гамма-кванты определённых энергий.

Представленные данные позволяют сделать вывод, что для оценки РЗС материалов и специальной одежды рационально использовать коэффициент ослабления потока моноэнергетического гамма-излучения изотопа кобальт-57 с энергией 122 кэВ ( $k_{122}$ ).

Показано также, что параметры излучения ( $N_u$ ,  $N_o$ ,  $N_\phi$ ) как первичные данные, полученные для определения  $k_{122}$ , могут использоваться и для других косвенных измерений: а) поверхностной плотности поглощающей добавки, содержащейся в материале; б) коэффициента ослабления гамма-излучения других энергий до 1 МэВ; в) свинцового эквивалента для КМ, содержащих иные поглощающие добавки; г) кратности ослабления экспозиционной дозы при наличии данных о спектральных характеристиках излучения.

В третьей главе изложена методика измерений  $k_{122}$  с помощью сцинтилляционного гамма-спектрометра, разработанная в Лаборатории атомного ядра ИЯИ РАН.

Измерения выполняются в два этапа (см. формулу 4): 1) прямые измерения параметров излучения ( $N_u$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{on}$ ) и 2) косвенные измерения параметра материала. Установка состоит из трех систем (рис. 1): 1) системы "источник-детектор", 2) системы измерения первичных данных, 3) системы обработки информации.

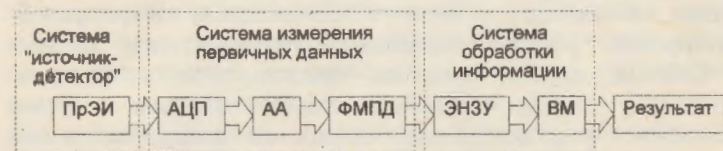


Рис. 1. Функциональная схема установки.

ПрЭИ – преобразователь энергии излучения в электрический импульс, АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь, АА – амплитудный анализатор, ФМПД – формирователь массива первичных данных, ЭНЗУ – энергонезависимое запоминающее устройство, ВМ – вычислительный модуль.

В первой системе с помощью сцинтилляционного блока детектирования (СБД) выполняется преобразование энергии гамма-квантов в электрические

импульсы пропорциональной амплитуды. Обеспечивается постоянная геометрия эксперимента, а также безопасность контроля благодаря применению ОСГИ.

Во второй системе выполняется преобразование импульсов в цифровой код, формирование энергетического гамма-спектра, наблюдение эффекта фотопоглощения и прямые измерения  $N_u$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{on}$ . Спектрограмма фона близка к прямой линии. Наличие в фоновом излучении составляющей изотопа приводит к увеличению счёта гамма-квантов в определенном интервале энергий; на соответствующем участке спектрограммы регистрируется характерный гамма-пик. Помещение в зазор "источник-детектор" объекта исследования приводит к уменьшению пика при неизменном времени набора спектра  $t$  и расстоянии  $L$  между источником и детектором. Вершина пика соответствует наиболее вероятной энергии гамма-квантов, испускаемых изотопом (в данном случае – 122 кэВ от <sup>57</sup>Co), а площадь равна сумме гамма-квантов пика в фиксированном интервале энергий – так называемой "зоне интереса" ( $\Delta E$ ). Зона интереса устанавливается симметрично относительно пика и включает примерно 3/4 площади пика. Сумма гамма-квантов  $\Delta E$  принимается за конечный результат измерения спектра. Значение суммы при измерениях с источником соответствует  $N_u$ , при просвечивании объекта –  $N_o$ . Для учета влияния фона измеряется  $N_\phi$  – количество гамма-квантов, регистрируемых в отсутствие источника при фиксированных  $\Delta E$  и  $t$ .

Для повышения точности каждый параметр  $N_u$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{on}$  измеряется многократно, к тому же  $N_{on}$  – в нескольких произвольно выбранных точках материала, а для одежды – в точках, определенных ТУ. Циклы измерений  $N_u$  и  $N_\phi$  проводятся дважды – до и после измерений с объектом. В результате на выходе второй системы формируется пять массивов первичных данных, которые записываются в ЭНЗУ.

В третьей системе выполняются косвенные измерения. Исходной информацией служат первичные данные, которые система считывает из ЭНЗУ. Вычисляются средние значения  $N_u$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{on}$ . Затем вычисляются коэффициенты ослабления для каждой из  $n$  точек ( $k_n$ ) и другие параметры, обусловленные ТУ. Результат измерений записывается в протокол. Схема накопления и обработки данных, включающая прямые измерения параметров излучения, формирование массивов первичных данных, косвенные измерения параметра материала ( $k_{122}$ ), приведена на рис. 2.

Точность измерений обеспечивает комплекс мер: исключение фактора накопления за счёт настройки  $\Delta E$ , контроль аппаратного дрейфа также с

помощью  $\Delta E$ , проведение многократных измерений для получения среднего значения и других, изложенных в гл. 6.

Для реализации схемы измерения в один измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) объединяются два устройства: прибор специального назначения – спектрометр и устройство широкого применения для обработки цифровой информации – компьютер стандартной комплектации: системный блок, экран, клавиатура, накопитель на магнитных дисках (НМД), принтер.

Технические параметры установки определяются точностью измерений, которая может быть достигнута при использовании ОСГИ, имеющих активность  $10^5$  Бк. Если диаметр сцинтилляционного детектора составляет 4 см, эффективность – 100%, расстояние между источником и детектором – 20 см, то число импульсов от источника на выходе СБД (так называемая загрузка) составит 785 имп/сек.

Исходя из соотношения относительной погрешности  $\delta$  и числа отсчетов  $N$  при регистрации ядерных частиц  $\delta = 1/\sqrt{N}$ , для обеспечения точности измерения 1% необходимо, чтобы сумма  $\Delta E$  составляла около 12000, что при указанной загрузке достигается при экспозиции около 15 сек.

В четвертой главе приведены сведения об ИВК на основе мини-ЭВМ, обеспечивающей как прямые, так и косвенные автоматизированные измерения. Тип ЭВМ обусловлен рамками задания, предписывающего использовать отечественное сертифицированное оборудование. Технические данные ЭВМ – быстродействие, разрядность, набор команд, наличие адаптеров для сопряжения с внешними устройствами, а также комплектация должны соответствовать ряду условий: загрузке, размеру суммы  $\Delta E$ , набору вычислительных операций; в качестве ЭЗУ используется накопитель на магнитных дисках (НМД).

Функции гамма-спектрометра выполняются благодаря оснащению ЭВМ внешними устройствами специального назначения (ВУС). Используются функциональные блоки ядерной электроники стандарта "Вектор" отечественного производства: СБД, усилитель-формирователь (УФ), амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП), быстродействующее запоминающее устройство (БЗУ), таймер. Испытания различных вариантов привело к внедрению ИВК, конфигурация которого представлена на рис. 3 и 4а.

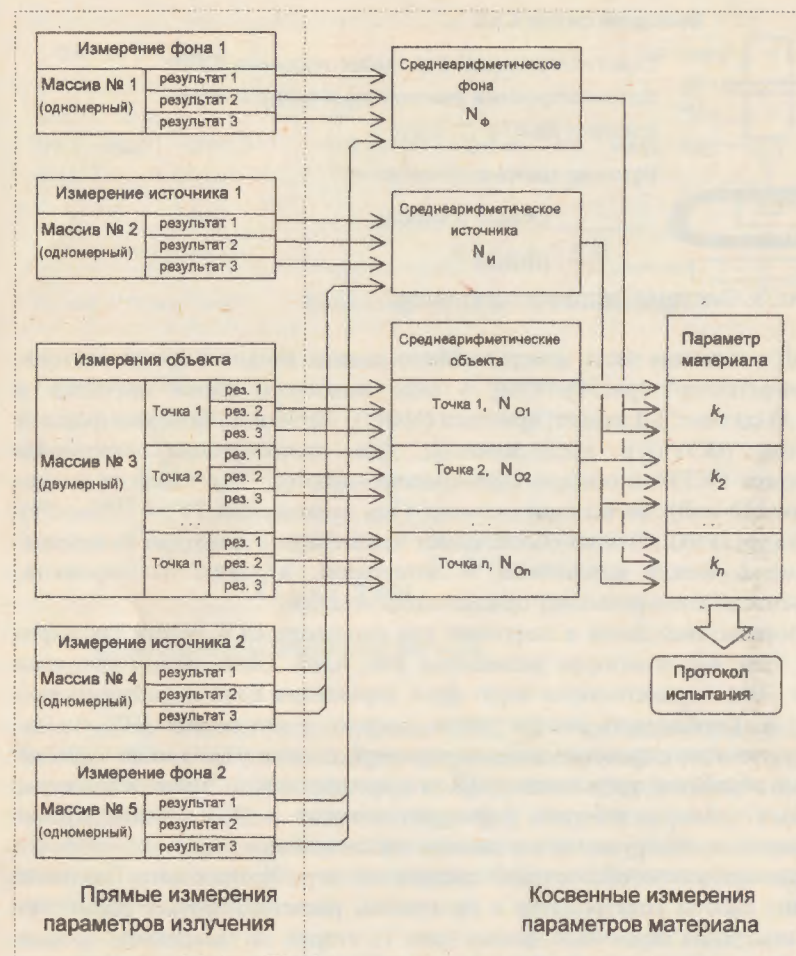


Рис. 2. Схема накопления и обработки данных при измерении радиационно-защитных свойств композиционных материалов.

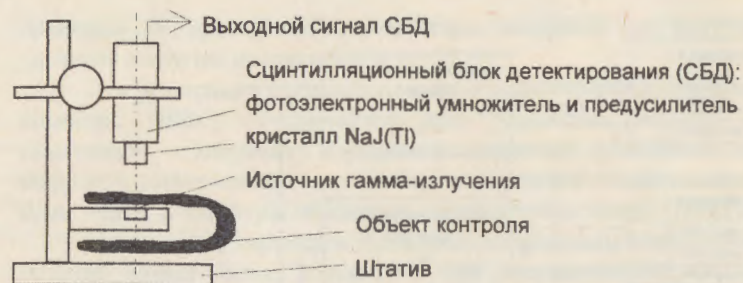
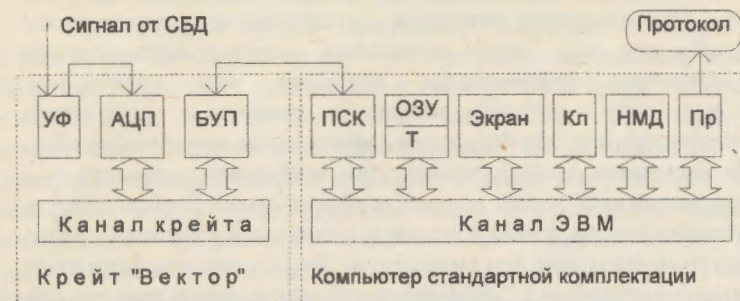


Рис. 3. Система "источник-детектор".

СБД – головная часть измерительного канала, входит в состав системы "источник-детектор" (рис. 3). СБД в виде выносного блока закреплен в штативе. В состав СБД входят: кристалл (NaJ(Tl) 40x40 мм), фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) и предусилитель. Для просвечивания материалов используются ОСГИ: в основных измерениях – изотоп  $^{57}\text{Co}$  (энергия гамма-излучения 122 кэВ), во вспомогательных (для выполнения ТУ) –  $^{113}\text{Sn}$  (393 кэВ),  $^{27}\text{Na}$  (511кэВ). Штатив обеспечивает неизменную геометрию измерения: расстояние  $L$  между источником и детектором, а также их соосность. Конструкция штатива позволяет просвечивать полости.

Преобразование импульсов в цифровой код производится в крейте стандарта "Вектор" (рис. 4а), в котором размещены УФ, АЦП. Связь между каналами крейта и ЭВМ осуществляется через блок управления БУП и интерфейсную плату ПСК. Особенность конфигурации состоит в отсутствии БЗУ – коды регистрируются непосредственно в оперативной памяти (ОЗУ) мини-ЭВМ по программе обработки прерывания АЦП, и в организации контроля экспозиции с помощью таймера, который формируется также в ОЗУ. Такой подход обусловлен низкой нагрузкой и одноканальной схемой измерения.

Математическое обеспечение состоит из двух программных модулей: программы работы спектрометра и программы расчетов; первый формирует систему измерения первичных данных (рис. 1), второй, по завершении прямых измерений, – систему обработки информации. НМД является связующим звеном между этапами измерений для передачи информации, что позволяет автоматизировать испытания. Программа спектрометра написана, в основном, на фортране; части, связанные с управлением ВУС – на ассемблере (PDP-11). На фортране целиком написана программа расчетов. Оба модуля хранятся в файлах на магнитном диске; первый модуль занимает 22 кб, второй – около 18,5 кб.



а)



б)

Рис. 4. Схемы структурные ИВК: а – оснащённого модулями "Вектор" б – с использованием встраиваемого АЦП. УФ – усилитель-формирователь, АЦП – амплитудно-цифровой преобразователь, БЗУ – быстродействующее запоминающее устройство, БУП – блок управления, ПСК – плата сопряжения каналов, ОЗУ – оперативная память, Т – таймер, Кл – клавиатура, НМД – накопитель на магнитном диске, Пр – принтер.

Разработан алгоритм, обеспечивающий простоту измерений. Под управлением первого программного модуля выполняются прямые измерения в автоматическом режиме. Используются следующие функции сцинтилляционного гамма-спектрометра: амплитудный анализ импульсов, поступающих от СБД; формирование спектрограммы; отсчет живого времени экспозиции; выполнение паузы между экспозициями; установка зоны интереса; вычисление суммы в зоне интереса; автоматическая запись суммы, а также

номера точки объекта и номера испытания, в файл на НМД; открытие-закрытие файла с фиксированным названием, соответствующим измеряемому параметру:  $N_u$ ,  $N_\phi$  или  $N_{on}$ . Запуск программы сопровождается чтением уставок из отдельного файла-данных, благодаря чему спектрометр автоматически выводится в исходное положение, заданное в предыдущий сеанс; то же происходит при возобновлении работы после аппаратного сбоя, например, из-за нарушения электропитания. При измерениях параметра  $N_{on}$  организована автоматическая запись данных, в объеме одного буфера НМД, в ряд последовательных файлов, чтобы в условиях длительных измерений свести к минимуму потери информации при аппаратном сбое. Программа формирует среду дружественного интерфейса "ЭВМ-оператор": используется графический режим экрана ЭВМ с элементами анимации для отображения спектрограммы, управления маркером, назначения зоны интереса, изменения масштаба и т.п. На экран выводятся тексты подсказок и списки команд (меню) в соответствии с ситуацией; активизацию команды оператор производит с клавиатуры после установки отметчика на нужный пункт меню.

Второй программный модуль выполняет косвенные измерения, которые начинаются с ввода оператором комментария к протоколу и числа файлов, содержащих массив  $N_{on}$ . Последующие операции протекают автоматически: чтение массивов первичных данных из НМД, вычисление средних  $N_u$ ,  $N_\phi$ ,  $N_{on}$ . В заключение вычисляются параметры материала для каждой из  $n$  точек. В зависимости от поставленной задачи параметрами могут быть: поверхностная плотность поглощающей добавки, коэффициент ослабления непосредственно измеряемого гамма-излучения и другие (см. заключение гл. 2). Для каждого случая необходима своя программа вычислений. Результат испытаний записывается в файл-протокол, который содержит комментарий, номер точки, среднее значение параметра материала, среднеквадратичное отклонение.

Имеется опыт использования нового поколения АЦП марки NVL32, встраиваемого в материнскую плату персонального компьютера (ПК) IBM, 486-й процессор (рис. 46). Плата АЦП оснащена БЗУ емкостью 128 кбайт, в котором регистрируются коды в порядке поступления. По заполнении БЗУ возбуждается аппаратное прерывание, которое ПК обслуживает по программе амплитудного анализатора. Первичные данные в виде сумм  $\Delta E$  накапливаются на винчестере. Мертвое время, затрачиваемое на обработку прерывания, учитывается таймером, который организован программно в оперативной памяти ПК. Выносной блок системы "источник-детектор" включает хорошо зарекомендовавшие себя модули системы "Вектор": СБД, блоки питания, усилитель-формирователь.

В пятой главе приведено краткое описание программ.

Программный модуль спектрометра включает основную программу, написанную на фортране, и 13 подпрограмм, написанных на ассемблере. Команды фортрана используются для чтения-записи в файл уставок спектрометра; записи в файлы результатов измерений. Оператору представляется список задач (меню) первого уровня: измерение фона первое/ измерение источника первое/ измерение объекта/ измерение источника второе/ измерение фона второе/ настройка/ выход. На ассемблере описан доступ к контроллеру графического дисплея для формирования изображения спектрограммы и анимации её элементов: кадра, маркера, зоны интереса. Написаны программы обслуживания аппаратных прерываний, поступающих от АЦП, таймера, клавиатуры. Организован вывод меню второго уровня по управлению спектрометром: выход/ пуск/ установка параметра. Меню третьего уровня предназначено для обработки операции "установка параметра": время набора/ время паузы/ номер точки/ номер испытания/. Параметр выбирается с помощью отметчика, который оператор перемещает по списку с помощью клавиш со стрелками.

Программный модуль вычислений разрабатывается экспериментатором в соответствии с поставленной задачей и с учётом формата записи исходных данных, сохранённых на НМД. Работа программы для данного случая изложена в гл. 4.

В пакет матобеспечения ИВК включены также два файла-данных с уставками для спектрометра и коэффициентами для проведения вычислений, что обеспечивает легкую переналадку ИВК. Файлы с уставками, файлы первичных данных и файл-протокол занимают около 6 кб.

В шестой главе рассматриваются факторы, влияющие на точность измерений. Источниками систематических погрешностей являются: нарушение геометрии эксперимента, нестабильность времени экспозиции, просчёты при регистрации гамма-квантов, повышенный счёт  $N_o$  из-за влияния фотонов вторичного излучения, аппаратный дрейф. Указаны способы их нейтрализации.

При испытаниях с применением слабого источника основной вклад в погрешность измерения вносит статистическая ошибка, возникающая при счёте гамма-квантов. Поскольку излучение гамма-квантов источником — процесс стохастический, поток излучения флюктуирует. При этом величина флюктуации функционально связана с числом зарегистрированных квантов. Приведена оценка относительной статистической погрешности ( $S_k/k$ ) при

измерении  $k_{122}$ . С учетом того, что  $k_{122}$  определяется косвенно по результатам прямых измерений, получена формула:

$$S_k/k = \sqrt{\frac{N_u}{(N_u - N_\phi)^2} + \left(\frac{N_u - N_o}{N_u - N_\phi}\right)^2} \times \frac{N_\phi}{(N_o - N_\phi)^2} + \frac{N_o}{(N_o - N_\phi)^2},$$

где  $S_k$  – среднеквадратичная статистическая погрешность для  $k_{122}$  – функции трех независимых параметров:  $N_u, N_o, N_\phi$ .

Для планирования измерений с помощью формулы по компьютерной программе рассчитана таблица значений относительной статистической погрешности (в %) в зависимости от счёта гамма-квантов источника  $N_u$ , влияния фона (отношение  $N_u/N_\phi$ ) и коэффициента ослабления  $k_{122}$ .

Для типичного материала, имеющего  $k_{122} = 3,5$ ; при  $N_u/N_\phi = 30$ ;  $N_u = 12000$  значение  $S_k/k$  составляет 2,11%. При необходимости  $S_k/k$  можно довести до 1,50%, если увеличить счёт  $N_u$  до 24000, но в этом случае возрастает время эксперимента. Значение  $S_k/k$  падает с уменьшением  $k_{122}$ ; например, для  $k_{122} = 2,5$   $S_k/k = 1,82\%$  и т.д. Объём таблицы составляет 6 страниц.

В **седьмой главе** обосновываются критерии выборочного контроля. Практика производства СЗО-1 показала, что входной контроль исходного материала является важнейшим, поскольку позволяет предупредить брак конечных изделий и избежать значительных экономических потерь. При высокой точности изготовления исходного материала можно отказаться от промежуточного контроля или выполнять его с минимальной выборкой, а массу костюма сделать минимальной.

Контроль неоднородности материала производится малым выборкам в произвольных точках с числом проб, определённых методами математической статистики. В результате получены следующие данные: для измерения  $N_\phi$  рекомендуется проводить 5 – 6 проб, для измерения  $N_u$  – 3 – 4 пробы; для оценки качества материала при входном контроле рекомендуется производить измерения в 10 – 15 точках на рулон (10 – 12 м длиной, 1 м шириной), по 3 – 4 пробы на каждую точку.

Данные предварительных выборок при входном контроле показывают, что коэффициент вариации коэффициента ослабления меняется в пределах 3 – 10%, что обусловлено неравномерным распределением поглощающей добавки в материале. Отслеживая коэффициент вариации, получаемого по результатам испытания отдельного рулона, можно производить отбраковку исходного материала. Тем самым предотвращаются брак конечной продукции и экономические потери.

Коэффициент вариации при измерении отдельной точки составляет от 5% (для  $N_\phi \approx 10^2$ ) до 1% (для  $N_u \approx 10^4$ ), что находится в согласии с расчетной точностью метода и свидетельствует о стабильной работе аппаратуры.

Область применения неразрушающего радиационного метода контроля можно расширить – использовать его на производстве, выпускающем КМ, с целью наладки оборудования для получения полотна с равномерным распределением поглощающей добавки. Для этого требуется разработка отдельной методики. Например, статистическая обработка данных, получаемых при просвечивании полотна по краям, в середине, а также от точки к точке в продольном направлении, позволяет выявить клиновидную или периодически меняющуюся неоднородность, возникающую от прокатки материала непараллельными валками или валками овального сечения, и получить параметры для наладки оборудования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе получены следующие результаты:

1. Разработан способ контроля РЭС композиционных материалов и спецодежды пожарных. Контроль производится неразрушающим радиационным методом с помощью скинтилляционного гамма-спектрометра. В условиях швейного производства обеспечивается контроль материалов, имеющих общую поверхностную плотность около  $1 \text{ г/см}^2$ , по содержанию свинца (или иной поглощающей добавки) – около  $0,5 \text{ г/см}^2$ . Характеристиками материала служат: а) коэффициент ослабления материалом потока монохроматического гамма-излучения изотопа кобальт-57 с энергией 122 кэВ ( $k_{122}$ ); б) поверхностная плотность поглощающей добавки (свинца), содержащейся в материале.
2. Обеспечена безопасность контроля благодаря использованию для просвечивания материала спектрометрических гамма-источников (ОСГИ), предназначенных для калибровки аппаратуры. Активность источников составляет менее 100 кБк, что на порядок меньше минимальной значимой активности (МЗА) источника на рабочем месте по Нормам радиационной безопасности (НРБ-99). Вклад в мощность дозы на расстоянии 0,5 метра ниже естественного гамма-фона. Такие показатели позволяют организовать участок контроля в помещении без специальной защиты.
3. Достигнута точность измерения  $k_{122}$ , составляющая 1,5 – 3%, что позволяет выпускать защитную одежду минимальной массы.

4. Проведен анализ источников ошибок и определен метод расчёта погрешности при измерении  $k_{122}$ . Рассчитаны таблицы и составлены графики, позволяющие пользователю оптимизировать режим измерений.
5. Создано автоматизированное рабочее место, оснащенное измерительно-вычислительным комплексом, аппаратную часть которого составляют блоки ядерной электроники и мини-ЭВМ стандартной комплектации. Комплекс оснащен аттестованным серийным отечественным оборудованием, что является необходимым условием сертификации продукции.
6. Создан интерфейс ввода-вывода данных, обеспечивающий комплексную автоматизацию измерений, включая накопление первичных данных, их сортировку и вычисление характеристики материала.
7. Создан интерфейс "человек-машина", позволивший адаптировать ИВК к эксплуатации персоналом средней квалификации после недельного обучения на рабочем месте.
8. Разработана методика определения параметров приёмочного статистического контроля РЗС исходного материала.
9. Разработанный способ безопасного автоматизированного контроля радиационно-защитных свойств КМ может быть использован для испытаний других материалов, изделий и средств защиты.

**Основные материалы диссертации опубликованы в работах:**

1. Бенецкий Б.А., Кузнецов А.Н., Лифанов М.Н., Лобов А.П., Перцовский Г.А., Плотникова М.В., Филатов В.Н. Методика определения эффективности специальных радиационных материалов и изделий из них при воздействии гамма-излучения// Исследования в области создания текстильных материалов/ Под ред. В.М. Филатова. –М.: ЦНИИТЭлектром, 1992. – С.8–15.
2. Лифанов М.Н. Комплекс для испытания радиационно-защитных текстильных материалов и защитной одежды//Тез. докл. третьей конференции: Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений. – М.: Институт ядерных исследований Российской академии наук, 25–26 мая 1999. – С. 9.
3. Бенецкий Б.А., Лифанов М.Н., Самсонов А.Е. Испытания радиационно-защитных свойств образцов строительных материалов, изготовленных на основе переработки кинескопного стекла// Сб. науч. тр. Нелинейные явления в открытых системах/ под ред. академика Лупичева Л.Н. – М.: Гос. ИФТП, 2000. – Вып. 11. – С. 151 – 159.
4. Лифанов М.Н. Модернизированный комплекс для испытания радиационно-защитных текстильных материалов и защитной одежды// Тез. докл. пятой научно-практической конференции: Радиационные поражения и перспективы развития средств индивидуальной защиты от ионизирующих излучений. 7-8 декабря 2000 г. – М.: Медицинский центр Управления делами Президента РФ. 2000. – С. 23.
5. Лифанов М.Н. Технология контроля радиационно-защитных свойств композиционных материалов и специальной защитной одежды пожарных, охраняющих АЭС. – М.: Препринт Ин-та ядерных исследований (ИЯИ) РАН. 1129/2004. – 2004. – 16 с.
6. Лифанов М.Н. Опыт автоматизации измерений с помощью гамма-спектрометра, адаптированного к работе на малосерийном производстве. – М.: Препринт Ин-та ядерных исследований (ИЯИ) РАН. 1132/2004. – 2004. – 12 с.

Ф-т 60x84/8. Уч.-изд.л. 1,5 Зак. № 21468 Тираж 100 экз.  
 Бесплатно  
 Отпечатано на компьютерной издательской системе  
 Издательский отдел Института ядерных исследований  
 Российской академии наук  
 117312, Москва, проспект 60-летия Октября, 7а