

16-99-10

На правах рукописи

М-749

МОКРОВ  
Юрий Владимирович

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ  
И СРЕДСТВ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
РАДИАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ  
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА УСКОРИТЕЛЯХ И ИМПУЛЬСНЫХ РЕАКТОРАХ

Специальность: 05.11.15 — метрология  
и метрологическое обеспечение;  
05.11.10 — приборы и методы для измерений  
ионизирующих излучений и рентгеновские приборы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва 1999

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

На современных ускорителях и реакторах и в окружающей их защите возникает ионизирующее излучение, состоящее из широкого класса элементарных частиц: протонов, нейтронов, мезонов различных видов, электронов, фотонов и др. Несмотря на наличие биологической защиты этих установок, персонал, работающий на них, подвергается воздействию сложного по компонентному составу ионизирующего излучения широкого энергетического диапазона, изменяющегося во времени и в пространстве. Однако, основной вклад в эффективную эквивалентную дозу облучения персонала, которая характеризует степень вредного воздействия ионизирующего излучения, вносит более ограниченный набор частиц, состоящий в основном из вторичного излучения, генерируемого в защите. Так, при работе ускорителей частиц высоких энергий радиационная обстановка в местах наиболее вероятного пребывания персонала определяется в большей степени нейтронами, как правило, с энергией до 20 МэВ. На реакторах эквивалентная доза формируется нейтронами с энергией до 20 МэВ и гамма-излучением, причем вклад каждого вида излучения может колебаться в значительных пределах.

При осуществлении радиационного контроля (РК) нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах и его метрологического обеспечения возникает ряд проблем, обусловленных как особенностями работы таких установок, так и неудовлетворительным состоянием серийного производства дозиметров нейтронов. К ним прежде всего относится широкий энергетический диапазон полей нейтронного излучения и их импульсный характер, при котором скважность может достигать десятков тысяч. Условия поверки дозиметров с использованием существующих методов и средств значительно отличаются от условий проведения измерений, что может приводить к большим дополнительным погрешностям средств измерений, иногда в несколько раз превышающим их основную погрешность.

В связи с этим к основным задачам метрологического обеспечения РК относится правильный выбор методов и средств дозиметрии, в том числе создание приборов для проведения радиационного контроля, изучение их метрологических характеристик и особенностей использования в специфических полях излучений, образующихся в процессе работы ускорителей и реакторов, разработка и внедрение методов поверки этих средств с применением как стандартных методик на основе радионуклидных источников, так и полей ЯФУ и опорных полей, проблема интерпретации показаний средств измерений с учетом различия условий их применения и поверки.

Большинство средств РК являются приборами непосредственного контроля, в детекторах и электронных устройствах которых параметры ионизирующих излучений преобразуются непосредственно в параметры электрических сигналов (импульсов), как правило, в частоту их следования. Детекторы и электронные устройства таких приборов обладают некоторой инерционностью, выражающейся в том, что в течение некоторого времени после регистрации частицы, называемым обычно мертвым временем, они не способны

Работа выполнена в Отделении радиационных и радиобиологических исследований Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:

Кандидат физико-математических наук, ст.н.с. Г.Н.Тимошенко

Официальные оппоненты:

Доктор физико-математических наук, профессор В.Н.Лебедев

Кандидат технических наук, ст.н.с. П.Ф.Масляев

Ведущая организация – НАУЧНО-ИНЖЕНЕРНЫЙ ЦЕНТР  
“СНИИП”, г. Москва

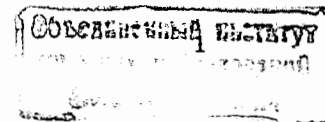
Защита диссертации состоится “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 199 г.  
в \_\_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета Д 041.02.01  
при ГП “ВНИИФТРИ”, 141570, Московская область,  
Солнечногорский район, п. Менделеево.  
Тел.: 5359385, 5359301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГП  
“ВНИИФТРИ”.

Автореферат разослан “\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 199 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета

Иванова Ю.Д.



зарегистрировать (произвести отсчет) следующую частицу. Наличие мертвого времени приводит к просчетам приборов (потери среднего числа отсчетов), так как число отсчетов оказывается меньше числа попавших в рабочий объем детектора прибора частиц (с учетом эффективности регистрации). Импульсность излучения вызывает существенное увеличение просчетов по сравнению с просчетами в стационарных полях, что приводит к появлению дополнительных погрешностей измерений и снижению (до тысячи и более раз) верхних диапазонов измерений приборов.

Проблема обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения серийными средствами измерений до сих пор удовлетворительно не решена: номенклатура выпускаемых приборов очень ограничена, а их характеристики, в частности, такая важная для дозиметров нейтронов, как энергетическая зависимость чувствительности, изучены недостаточно полно. Приемлимые для использования в РК на ускорителях индивидуальные дозиметры нейтронов промышленностью по-прежнему не выпускаются. В такой ситуации большинство научных центров идет по пути создания для собственных нужд средств измерений, не предназначенных для массового производства. В связи с этим особую актуальность приобретает изучение метрологических характеристик создаваемых и используемых в практике радиационного контроля средств измерений.

Передача размеров единиц величин от эталонов к рабочим средствам измерений осуществляется, в основном, с помощью радионуклидных источников нейтронов путем поверки и калибровки, но дозиметры используются, как правило, в иных, чем при поверке, условиях. В частности, в полях более широкого, чем у нейтронного излучения радионуклидных источников, энергетического диапазона, что вызывает появление дополнительных погрешностей средств измерений. Это приводит к необходимости создания опорных полей как на ЯФУ, так и на основе радионуклидных источников, помещенных в различные среды.

Сформулированные выше проблемы и определили круг решаемых в диссертации задач.

Необходимо отметить, что в последнее время международные организации рекомендуют новые величины для применения в радиационном контроле, в частности, ambientную эквивалентную дозу. В настоящей работе эквивалентная дозарассматривается как максимальная эквивалентная доза (МЭД) в соответствии с действующими Нормами радиационной безопасности НРБ-76/87.

#### Цель работы

Исследование метрологических характеристик и разработка средств радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах, позволяющих изучить и существенно уменьшить погрешности средств измерений, обусловленные широким энергетическим диапазоном и импульсным характером излучения этих установок и отличием энергетической зависимости чувствительности дозиметров от энергетической зависимости эквивалентной дозы.

#### Новизна работы

1. Получены новые экспериментальные данные об одной из важнейших метрологических характеристик ряда дозиметров и радиометров нейтронов - энергетической зависимости чувствительности в различных диапазонах энергии в области от тепловых нейтронов до 14 МэВ. На основе полученных данных предложен способ оценки и существенного уменьшения погрешностей дозиметров нейтронов, обусловленных отличием их энергетических зависимостей чувствительности от энергетической зависимости удельной эквивалентной дозы.

Получены новые экспериментальные данные о чувствительности образцового всеволнового счетчика ОВС-3М в диапазоне энергий 1 эВ - 4 кэВ и экспериментально определены значения чувствительности многосферного спектрометра нейтронов с детектором LiJ(Eu) в области промежуточных и быстрых нейтронов.

2. Впервые экспериментально изучены погрешности дозиметров непосредственного контроля, обусловленные их просчетами в полях импульсного излучения ускорителей и реакторов ОИЯИ, и разработан метод оценки и уменьшения погрешностей этих средств измерений в зависимости от регистрируемых ими величин и временных режимов работы ЯФУ.

На основе активационного детектора из серебра и газоразрядного счетчика в комбинированном замедлителе разработан прибор для непосредственного измерения эквивалентной дозы нейтронов в импульсных полях с большой скажностью излучения.

3. Создан комбинированный индивидуальный дозиметр (КИД), в котором измерение эквивалентной дозы нейтронов осуществляется на основе сочетания альбедного (с термомолюминисцентными детекторами - ТЛД) и фотографического (с ядерными эмульсиями) методов регистрации, изучены его метрологические характеристики на радионуклидных источниках нейтронов, в опорных полях на их основе, и в полях ускорителей ОИЯИ.

4. На основе радионуклидного источника Cf-252 в шаровых полиэтиленовых замедлителях созданы опорные поля нейтронов, позволяющие проводить поверку дозиметров в полях излучений, близких по своим характеристикам к контролируемым полям за защитой ЯФУ ОИЯИ.

#### Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Полученные энергетические зависимости чувствительности ряда дозиметров нейтронов позволяют оценивать и учитывать их погрешности, обусловленные отличием этих зависимостей от энергетических зависимостей эквивалентной дозы, при использовании в РК как в полях с известными спектрами нейтронов, так и в местах типичных условий их формирования. Показано, что широко применяемый в системах радиационного контроля на ускорителях и импульсных реакторах ОИЯИ дозиметр нейтронов на основе счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе имеет погрешность, обусловленную энергетической зависимостью чувствительности, не превышающую 30% при измерении максимальной эквивалентной дозы для

большинства спектров нейтронов в местах пребывания персонала. Аналогичная погрешность серийного дозиметра ДН-А-1 не превышает 40%.

2. Экспериментально определенные значения чувствительности детектора  $\text{LiJ}(\text{Eu})$  в замедлителях (многошаровой спектрометр нейтронов) в сочетании с представленными расчетными и измеренными значениями чувствительности этого детектора, полученными другими авторами в диапазоне от тепловых до быстрых нейтронов, могут быть использованы при выборе матрицы функций чувствительности спектрометра для ее практического использования и при оценке погрешности восстановления энергетических спектров нейтронов и получаемых из спектров величин (флюенса, дозы и т.п.).

3. Результаты экспериментального изучения просчетов ряда дозиметров нейтронов в полях импульсного излучения ускорителей и реакторов использованы для установления допустимых верхних пределов измерений этих приборов и введения коррекции в их показания при работе в таких полях.

4. Дозиметр нейтронов непосредственного контроля на основе активационного детектора из серебра и газоразрядного счетчика в комбинированном замедлителе используются в течение длительного времени в РК на ускорителях и импульсных реакторах ОИЯИ в полях с большой скважностью излучения, где применение других средств измерений аналогичного назначения невозможно из-за значительных погрешностей и существенного снижения верхнего предела измерений вследствие просчетов.

5. Комбинированный индивидуальный дозиметр (КИД) в течение ряда лет проходил опытную эксплуатацию в ОИЯИ при проведении индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) персонала в смешанных полях нейтронного и фотонного излучений. Применение КИД позволяет исключить ряд дополнительных погрешностей средств ИДК, повысить его оперативность и автоматизировать большую часть процесса получения информации о дозах облучения персонала.

6. Опорные поля ОИЯИ на основе радионуклидного источника  $\text{Cf-252}$  в шаровых полиэтиленовых замедлителях предназначены для поверки и калибровки дозиметров и радиометров нейтронов, сличения различных средств и методов дозиметрии, что уменьшает погрешности измерения эквивалентных доз при проведении РК на ускорителях и реакторах.

#### К защите представлены следующие положения:

1. Измеренные энергетические зависимости чувствительности ряда дозиметров нейтронов позволили оценить и уменьшить их погрешности, обусловленные отличием этих зависимостей от энергетической зависимости удельной эквивалентной дозы, при использовании таких средств измерений в радиационном контроле нейтронного излучения. Результаты измерения чувствительности детектора  $\text{LiJ}(\text{Eu})$  в замедлителях (многошаровой спектрометр нейтронов) позволяют осуществить более обоснованный выбор расчетных функций чувствительности этого спектрометра при его использовании в полях с различным энергетическим составом, что увеличивает достоверность восстановления спектров нейтронов по результатам измерений со спектрометром.

2. Установленные количественные закономерности появления просчетов дозиметров нейтронов непосредственного контроля в импульсных полях излучений ускорителей и реакторов ОИЯИ позволяют определять границы их применимости и новые (сниженные) верхние пределы измерений или вводить поправки в показания дозиметров при использовании в таких полях. Разработанный дозиметр нейтронов непосредственного контроля на основе активационного детектора из серебра и газоразрядного счетчика в комбинированном замедлителе в десятки, и более раз увеличивает верхний предел регистрируемых значений мощностей эквивалентных доз в импульсных полях излучения с большой скважностью.

3. Созданный комбинированный индивидуальный дозиметр (КИД) обеспечивает измерение индивидуальных эквивалентных доз персонала, работающего в полях ускорителей и реакторов. КИД позволяет увеличить энергетический диапазон и верхний предел измеряемых величин, исключить ряд дополнительных погрешностей и повысить оперативность ИДК.

4. Опорные поля, созданные на основе радионуклидного источника  $\text{Cf-252}$  в шаровых полиэтиленовых замедлителях, расширяют энергетический диапазон рабочих эталонов, используемых для поверки и калибровки средств дозиметрии и радиометрии нейтронов, что уменьшает погрешности этих средств измерений при проведении РК на ускорителях и реакторах по сравнению с их поверкой и калибровкой по радионуклидным источникам стандартными методами.

#### Апробация работы

Результаты диссертации докладывались на научно-методических семинарах Отдела радиационной безопасности и радиационных исследований ОИЯИ, на VI Отраслевой научно-технической конференции по организации и методам дозиметрического контроля условий труда, г. Обнинск, 1979, на семинарах подсекции "Радиационная защита и работа в условиях высоких уровней ионизирующего излучения" при Совете по проблемам ускорения заряженных частиц АН СССР (Сухуми, 1982; Дубна, 1982; Харьков, 1984), на Межреспубликанских семинарах по прикладной дозиметрии (Одесса, 1985, 1987), на Всесоюзных координационных совещаниях по методам индивидуальной дозиметрии (Москва, 1985, 1987).

#### Публикации

Основное содержание диссертации изложено в публикациях, приведенных в конце автореферата.

#### Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения; содержит 140 страниц текста, в том числе 49 рисунков, 10 таблиц и список литературы из 106 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** дано обоснование актуальности и важности решаемых вопросов приборного и метрологического обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах.

В **ПЕРВОЙ ГЛАВЕ** содержится обзор состояния методов и средств измерений, используемых в радиационном контроле нейтронного излучения, в том числе в индивидуальном дозиметрическом контроле персонала. Рассмотрены импульсный характер полей излучения нейтронов на ускорителях и импульсных реакторах и особенности использования в таких полях средств измерений непосредственного контроля. Описаны состав, характеристики и пути использования опорных полей, основанных на применении радионуклидных источников нейтронов в различных средах.

Рассмотрены средства измерений с детекторами тепловых нейтронов в замедлителях, одном или в их наборе, использующие метод термализации нейтронов широкого диапазона энергий, и широко известный многосферовой спектрометр (спектрометра Боннера). В качестве дозиметров нейтронов чаще всего используются газоразрядные счетчики или сцинтилляционные детекторы в цилиндрических или шаровых замедлителях из полиэтилена с толщиной замедляющего слоя около 12 см. Измерители потока имеют толщину замедляющего слоя несколько более 6 см. Это примерно соответствует сферам многосферового спектрометра диаметром 25,4 и 12,7 см ( 10 и 5 дюймов).

Возможность использования таких средств измерений в качестве дозиметров нейтронов и возникающие погрешности измерений обусловлены энергетической зависимостью их чувствительности (функцией чувствительности - ФЧ), а именно, ее отличием от энергетической зависимости эквивалентной дозы на единичный флюенс нейтронов в рабочем диапазоне энергий дозиметра. Для большего приближения ФЧ к этой зависимости используются составные замедлители с прослойкой внутри них материала, поглощающего тепловые нейтроны (кадмий или карбид бора). Отмечена недостаточная изученность ФЧ как у серийных дозиметров нейтронов указанного типа, таких, как ДН-А-1, КДН-2, так и у широко используемого в ОИЯИ дозиметра на основе счетчика СНМ-14 в комбинированном полиэтиленовом замедлителе. Указанное обстоятельство, а также расхождение между расчетными и экспериментальными данными по энергетическим зависимостям чувствительности многосферового спектрометра в области промежуточных нейтронов обосновывает необходимость работ по экспериментальному определению и сравнению ФЧ перечисленных средств измерений.

Импульсный характер полей нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах приводит к значительному увеличению просчетов приборов радиационного контроля, по своим характеристикам предназначенным для работы в стационарных полях, что вызывает появление дополнительных погрешностей измерений. Следствием этого является снижение верхнего диапазона измерений приборов в тысячу и более раз. Отсюда следует необходимость изучения работы средств измерений непосредственного контроля в импульсных полях нейтронного излучения с целью оценки просчетов,

прогнозирования их появления и установления более низких верхних пределов измерения приборов.

Другим решением данной задачи является создание специального дозиметра для оперативных измерений эквивалентных доз нейтронного излучения в импульсных полях с большой скважностью, где невозможно применение обычно используемых дозиметров нейтронов.

В индивидуальной дозиметрии нейтронов в качестве основных используются фотографический метод регистрации нейтронов, основанный на применении ядерных эмульсий, и термомолюминисцентный, применяемый в альбедных дозиметрах различной модификации. Эти методы имеют свои достоинства и недостатки, однако обойтись только одним из них в индивидуальной дозиметрии нейтронов на ускорителях по ряду причин не представляется возможным. Это обусловило необходимость создания дозиметра, в котором использовались бы оба отмеченных метода регистрации с сочетанием преимуществ каждого из них.

Метрологическое обеспечение радиационного контроля в полях нейтронов, в том числе такой важный его элемент, как поверка и калибровка средств измерений, проводится с помощью радионуклидных источников нейтронов, в основном Pu-Be и Cf-252. Однако широкий энергетический диапазон полей нейтронного излучения на ускорителях и реакторах, а также отличие энергетических зависимостей чувствительности используемых в радиационном контроле приборов от требуемой зависимости (например, максимальной удельной эквивалентной дозы от энергии или постоянной чувствительности потокомера) делает необходимым применение в метрологической практике также и опорных полей с параметрами, отличными от параметров упомянутых источников нейтронов и близкими к параметрам контролируемых полей. Прежде всего это относится к средней энергии спектра нейтронов и значению удельной эквивалентной дозы. Широкое применение в качестве опорных полей находят поля нейтронов, основанные на использовании радионуклидных источников нейтронов в замедлителях различных размеров.

Во **ВТОРОЙ ГЛАВЕ** описаны эксперименты по определению ФЧ средств измерений, используемых в дозиметрии, радиометрии и спектрометрии нейтронов. Приведены результаты измерения ФЧ серийных дозиметров (ДН-А-1, КДН-2, РУС-У8) и счетчика СНМ-14 в комбинированном полиэтиленовом замедлителе, образцового всеволнового счетчика ОВС-3М и многосферового спектрометра с замедлителями диаметром 7,6 и 25,2 см.

В процессе измерений определялись значения чувствительности указанных средств измерений к нейтронам узких энергетических диапазонов на ЯФУ ОИЯИ и СНИИП.

На импульсном быстром реакторе ИБР-30 чувствительность приборов при различных энергиях измерялась в диапазоне от 1 эВ до 4 кэВ, при этом энергия нейтронов определялась по времени пролета ими известного расстояния (метод времени пролета). Измерения проводились на расстоянии 1000 м от активной зоны реактора при его мощности 20 кВт и частоте следования импульсов 4 Гц в коллимированном пучке нейтронов. Чувствительность при различных энергиях определялась как отношение показаний приборов (числа импульсов), получаемых

из временных распределений импульсов к флюенсам нейтронов с этой же энергией в месте расположения детекторов. Значение флюенсов нейтронов при различных энергиях определялись тремя различными методами:

- с использованием показаний  $1/v$  – счетчика СНМ-11, проградуированного в месте измерений с помощью тонких золотых фольг толщиной 20 мкм;
- по результатам измерения спектра нейтронов, полученного из временного распределения сигналов пропорционального газонаполненного счетчика СНМО-5;
- по измерениям с образцовым всеволновым счетчиком ОВС-3М с использованием результатов его градуировки по нейтронам Pu-Be источника. Показания ОВС-3М использовались для обработки данных после проверки постоянства его чувствительности в исследуемом диапазоне энергий. Результаты измерений чувствительности прибора в диапазоне энергий от 1 эВ до 4 кэВ в пределах погрешности их определений, не превышающей 10%, совпадают со значениями чувствительности, измеренными другими авторами на радионуклидных источниках нейтронов (от Sb-Be до Pu-Be).

Энергетическая зависимость чувствительности РУС-У8 и КДН-2 определялась на реакторе ИБР-30 только сравнением их показаний с показаниями ОВС-3М.

В диапазоне энергий от 17 кэВ до 1 МэВ энергетические зависимости чувствительности определялись на электростатическом генераторе ЭГ-2,5 СНИИП. Моноэнергетические нейтроны получались из реакции  $T(p,n)^3He$  на тритиевой мишени при трех значениях энергии падающих на мишень протонов, при этом детекторы располагались под углами от 30 до 120 градусов к направлению пучка протонов. Энергия нейтронов определялась по кинематическим таблицам в зависимости от угла расположения детектора и энергии протонов. Измерения проводились на расстояниях от 1 до 2,5 м от мишени. Чувствительность приборов определялась сравнением при одной и той же энергии с чувствительностью ОВС-3, проградуированного по Pu-Be источнику первого разряда, помещенному в гнезде в месте расположения мишени. Фон рассеянных нейтронов определялся по результатам измерений с экранирующим конусом.

При энергии 30 кэВ чувствительность определялась на электростатическом генераторе ЭГ-5 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. Источником нейтронов служила мишень из  $Li_2CO_3$  на медной подложке, облучаемой протонов с энергией 1891 кэВ. Нейтроны образовывались в реакции  ${}^7Li(p,n){}^6He$ , их спектр имеет вид треугольника с максимумом при энергии 30 кэВ и простирается от 8 до 70 кэВ с шириной на половине высоты распределения около 20 кэВ. Чувствительность приборов определялась двумя методами: относительно известной чувствительности детектора  $LiJ(Eu)$  в шаровом полиэтиленовом замедлителе диаметром 12,7 см и с использованием результатов нахождения полного выхода нейтронов из мишени, рассчитанного по активности образующегося в ней бериллия-7.

При энергии 14,2 МэВ чувствительность определялась на лазерном генераторе нейтронов (ЛГН) Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ. Нейтроны на ЛГН образуются в результате реакции  $T(d,n){}^4He$  на внутренней поверхности

титано-тритиевой мишени. Чувствительность приборов определялась сравнением с показаниями ОВС-3М, аттестованного во ВНИИМ им. Д.С. Менделеева, в том числе по нейтронам с энергией 14,2 МэВ. На рис.1 и 2 в качестве примера представлены полученные результаты измерений значений чувствительности прибора ДН-А-1 и дозиметра на основе счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе в единицах имп см нейтрон в исследуемом диапазоне энергий. Для счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе представлена также штрих-пунктиром чувствительность без кадмиевой прослойки внутри замедлителя. Пунктиром на этих рисунках представлены чувствительности гипотетических (идеальных) дозиметров, ФЧ которых соответствует ходу зависимости максимальной удельной эквивалентной дозы от энергии, нормированные для нейтронов Pu-Be источника к чувствительности исследуемых дозиметров. Степень отличия чувствительности этих дозиметров от чувствительности идеального дозиметра является основанием для решения о применимости дозиметров в полях нейтронов различных диапазонов энергии и для коррекции их показаний в таких полях.

Чувствительность многошарового спектрометра с замедлителем диаметром 7,6 см определялась в пучке реактора ИБР-30 в диапазоне энергий от долей до сотен эВ по описанной выше методике относительно чувствительности при энергии 80 эВ и нормировалась при этой энергии к данным, полученным экспериментально другими авторами. Необходимость измерения значений чувствительности обусловлена расхождениями данных разных авторов именно в этой области энергий. В работе приведены также результаты экспериментальных и расчетных работ разных авторов по функциям чувствительности многошарового спектрометра с замедлителями диаметром 5,1; 7,6; 12,7 и 25,4 см. Особое внимание при этом было уделено нормировке этих данных, так как расчеты и эксперименты выполнялись для разных вариантов спектрометра (размеры и упаковка сцинтилляторов, их типы и т.д.). На рис.3 представлены результаты измерений чувствительности многошарового спектрометра с замедлителем диаметром 7,6 см по данным настоящей работы, а также приведены расчетные и экспериментальные данные других авторов (аналогичные данные приведены в диссертации и для замедлителей других размеров). Представленные результаты позволяют более обоснованно выбирать расчетные значения функций чувствительности спектрометра при использовании его в полях нейтронов с различным энергетическим составом.

Значения чувствительности исследуемых приборов в некоторых диапазонах энергии отличаются от чувствительности идеального дозиметра в несколько раз (например, для ДН-А-1 в области энергий от 0,1 до 1 МэВ), но так как спектры нейтронов за защитой ЯФУ имеют широкий энергетический диапазон, то реальные погрешности дозиметров при измерениях в таких полях будут обусловлены ходом их ФЧ во всем диапазоне энергий. Для оценки этих погрешностей было выполнено сравнение значений эквивалентной дозы  $H_n$ , которую зарегистрировал бы в поле с известным спектром  $\Phi(E)$  прибор с чувствительностью  $\mathcal{E}(E)$  при градуировке его по Pu-Be источнику нейтронов, с действительным значением максимальной эквивалентной дозы  $H_n$ .

Величины  $H_n$  рассчитывались по формуле:

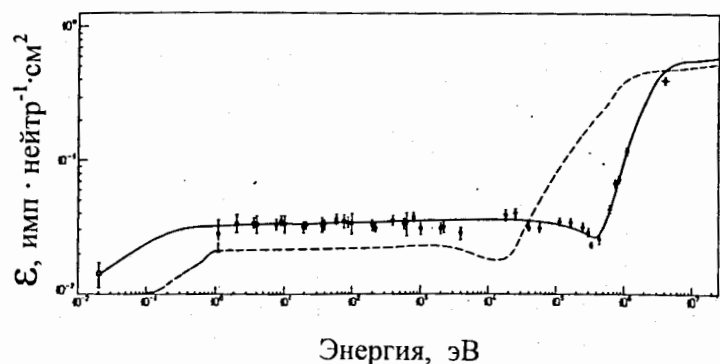


Рис. 1. Чувствительность ДН-А-1.

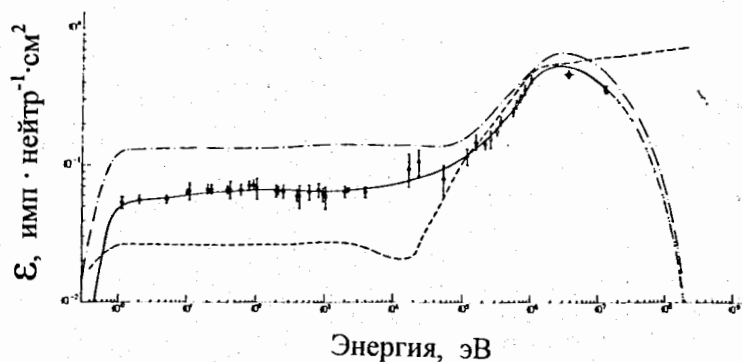


Рис. 2. Чувствительность счетчика СМ-14 с комбинированным замедлителем.

$$H_n = \frac{h_{Pu-Be}}{\bar{\epsilon}_{Pu-Be}} \int_{E_1}^{E_2} \epsilon(E) \cdot \Phi(E) \cdot dE \quad (1)$$

где  $h_{Pu-Be}$  - значение максимальной удельной эквивалентной дозы для нейтронов Pu-Be источника по ГОСТ 25935-83;  $\epsilon(E)$  - чувствительность дозиметра к нейтронам Pu-Be источника;  $E_1$  и  $E_2$  - границы энергетического спектра нейтронов.

В качестве  $H_q$  выбирались максимальные по глубинным распределениям для каждого спектра значения из величин  $H(d_i)$ , рассчитанных по формуле:

$$H(d_i) = \int_{E_1}^{E_2} H(E, d_i) \cdot \Phi(E) \cdot dE \quad (2)$$

где  $H(E, d_i)$  - эквивалентная доза как функция энергии нейтронов  $E$  и глубины  $d$  в фантоме. Сравнение проводилось для спектров общим количеством около 30, среди которых было выделено несколько групп:

- жесткие спектры за сплошными защитами ускорителей и экспериментальных каналов вывода пучков - их средняя энергия от нескольких МэВ до ста МэВ;
- мягкие спектры многократно рассеянного излучения за защитами ускорителей с проемами и в экспериментальных помещениях - средняя энергия от десятков до сотен кэВ;
- спектры за защитой импульсных реакторов - средняя энергия не превышает 1 МэВ.

Сравнения показали, что прибор на основе счетчика СМ-14 с комбинированным полиэтиленовым замедлителем с достаточной для хронического облучения точностью в 30% может быть использован в качестве дозиметра нейтронов с энергией от 0,4 эВ до 20 МэВ (т.е. в полях импульсных реакторов и в полях с мягкими спектрами за защитой ускорителей). При этом его показания, как правило, несколько (до 10%) завышены.

Погрешность прибора ДН-А-1 при измерениях в большинстве реальных спектров нейтронов за защитой ЯФУ ОИЯИ не превышает 40% при использовании его в качестве дозиметра нейтронов с энергией ниже 20 МэВ. В полях с жесткими спектрами прибор не может быть использован в качестве дозиметра.

Полученные результаты позволяют проводить корректировку показаний приборов при их использовании в полях с известными условиями формирования спектров нейтронов, уменьшая таким образом дополнительную погрешность этих средств измерений.

**В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ** описаны эксперименты по изучению просчетов средств измерений нейтронов в импульсных полях ионизирующих излучений ускорителей и реакторов ОИЯИ и специально разработанный на основе газоразрядных счетчиков СТС-5 и СТС-6 и активационного детектора из серебра в комбинированном полиэтиленовом замедлителе прибор для непосредственного измерения максимальных эквивалентных доз нейтронов в импульсных полях с большой скважностью излучения.

Просчеты приборов непосредственного контроля при использовании в таких полях имеют существенно большее значение, чем в стационарных полях

излучения при одних и тех же их регистрируемых средних скоростях счета. Это приводит к появлению больших дополнительных погрешностей, значительному снижению верхнего предела измерений приборов, а при неизученности особенностей работы приборов в таких полях - к возможному существенному занижению измеряемых величин.

Исходная формула, которая связывает регистрируемые скорости счета  $m$  приборов с непродолеваемым мертвым временем  $t$ , и скорости счета  $n$ , которые зарегистрировал бы прибор при отсутствии мертвого времени, в зависимости от частоты импульсов излучения  $f$  и их длительности  $T$  имеет вид:

$$m = \frac{n}{1 + \frac{n \cdot t_m}{f \cdot T}} \quad (3)$$

При этом просчеты приборов  $q$  в относительных единицах, определяемые как  $(n - m)/n$ , равны:

$$q = 1 - \frac{m}{n} = \frac{m \cdot t_m}{f \cdot T} \quad (4)$$

Практическая оценка просчетов с использованием формулы (4) даже в случае известных величин мертвого времени приборов и временных параметров работы установок затруднительна, т.к. параметр  $T$  характеризует лишь временное распределение пучков частиц, тогда как время взаимодействия нейтронов с детектором в замедлителе прибора будет превышать значения этого параметра. В связи с этим возникла задача экспериментального исследования просчетов приборов непосредственного контроля в импульсных полях излучения. Методика его состоит в сравнении их показаний с показаниями пассивных (интегрирующих, с активационными детекторами) приборов, облучаемых в одних и тех же точках при разных скоростях счета, достигаемых изменением мощности реактора или тока ускорителя.

По результатам измерений строилась зависимость отношений  $m/n$  в относительных единицах от  $m$ , представляющих собой величину  $1 - q$ . Аппроксимирующая функция для этого отношения  $f(m, t_{эф})$  выбирается на основании (4) в виде:

$$f(m, t_{эф}) = 1 - m \cdot t_{эф} = 1 - \frac{m \cdot t_m}{f \cdot T_{эф}} \quad (5)$$

где величина  $t_{эф} = \frac{t_m}{f \cdot T_{эф}}$  представляет собой эффективное мертвое время

прибора в поле импульсного излучения с эффективным временем  $T_{эф}$  действия излучения на детектор прибора в течение импульса излучения установки. Параметр  $t_{эф}$  определялся методом наименьших квадратов при аппроксимации результатов измерений отношений  $m/n$  функцией (5) для различных приборов и временных режимов работы установок. На рис. 4 приведены результаты экспериментального определения просчетов борного счетчика СМ-14 в замедлителе и без замедлителя в поле рассеянного излучения реактора ИБР-30 и

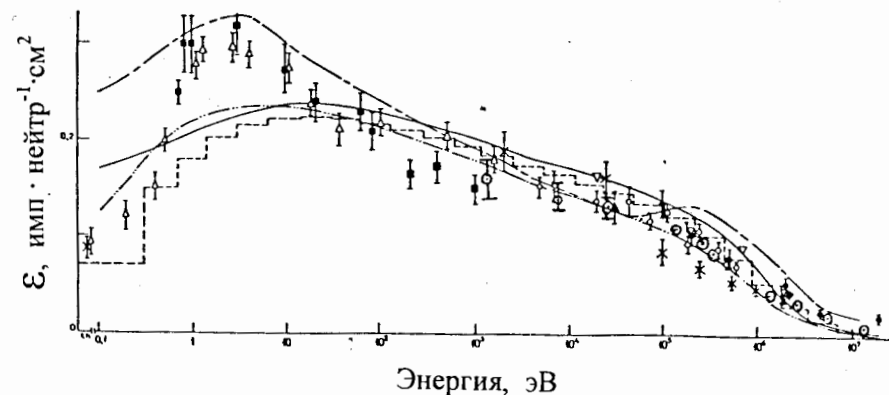


Рис. 3. Чувствительность детектора LiI(Eu) в замедлителе диаметром 7,6 см. ■, ▲, ◆ - данные настоящей работы, остальные обозначения и кривые - расчетные и экспериментальные данные других авторов (ссылки даны в диссертации)

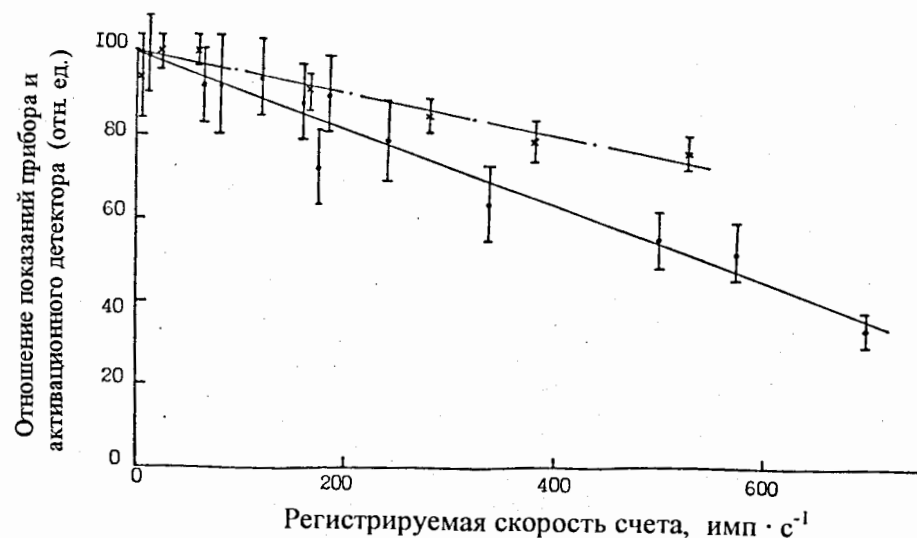


Рис. 4. Экспериментальные точки и аппроксимирующие функции просчетов борного счетчика без замедлителя (x) и с замедлителем (•) на ИБР-30.



аппроксимирующие их функции. В диссертации представлены полученные значения  $t_{эф}$  и  $T_{эф}$ , а также описана процедура выбора их значений для различных длительностей  $T$  импульса излучения установок. По полученным значениям  $T_{эф}$  и известным величинам мертвого времени приборов  $t_w^*$  по формуле (5) определяются просчеты приборов при измеренных ими значениях  $m$ . В конечном счете это позволяет исключить дополнительные погрешности приборов, обусловленные просчетами. По результатам работы для использования в рутинном радиационном контроле определены также верхние пределы показаний приборов для различных временных режимов работы установок, при которых их просчеты не превышают 10%. В некоторых случаях верхняя граница диапазона измерений дозиметрических приборов уменьшается в тысячу и более раз.

В связи с этим был разработан и создан рабочий макет прибора на основе газоразрядного счетчика СТС-5, обернутого слоем серебра и помещенного в шаровой парафиновый замедлитель диаметром 25,4 см. Принцип действия прибора основан на регистрации счетчиком наведенной активности серебра в процессе экспозиции его детектора в точке измерений с вычитанием вклада в его показания от внешнего гамма-излучения. Прибор сочетает преимущества от использования активационного детектора - нечувствительность к импульсности излучения, простоту и оперативность в работе, свойственную приборам непосредственного контроля. Определены характеристики прибора, проведено сравнение его показаний с показаниями многошарового спектрометра в поле излучения за защитой реактора ИБР-30.

Полученные с рабочим макетом прибора результаты использованы при создании сигнализатора о превышении дозы импульсного нейтронного излучения на основе прибора УСИТ-2 и переносного дозиметра на основе прибора РУП-1. В качестве детекторов в этих приборах используются счетчики СТС-6 и СТС-5, обернутые слоем серебра оптимальной толщины и помещенные, в комбинированный полиэтиленовый замедлитель. Для исключения вклада в показания прибора внешнего гамма-излучения используется канал компенсации фона прибора РУП-1. Приборы используются в оперативном радиационном контроле на синхрофазотроне и импульсных реакторах в полях с большой скважностью излучения. Применение приборов позволило существенно (в десятки и более раз) расширить диапазон измеряемых величин мощностей эквивалентных доз нейтронного излучения в таких полях.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ описывается конструкция и принцип действия комбинированного индивидуального дозиметра (КИД). В дозиметре предусмотрена возможность использования как альбедного способа регистрации нейтронов с применением двух пар ТЛД на основе фтористого лития с Li-6 и Li-7, так и других методов, например, фотографического с эмульсией МК-20 или трекового с детектором CR-39. В КИД предусмотрена также возможность регистрации доз гамма- и бета-излучения. В зависимости от практической необходимости КИД оснащается тем или иным набором детекторов, который позволяет регистрировать дозы облучения различных видов излучений.

Описана процедура и результаты градуировки КИД и его прототипа - альбедного дозиметра - на радионуклидных источниках нейтронов, в опорных

полях и на ядерно-физических установках ОИЯИ. Получены значения градуировочных коэффициентов дозиметра для различных ЯФУ и условий облучения на них. Это позволяет применять различные значения градуировочных коэффициентов, зависящие от мест работы персонала и от наличия дополнительной информации о некоторых характеристиках спектров нейтронов или условиях их формирования. Погрешность определения доз облучения в таких случаях не превышает 30%. В некоторых случаях (при дозах облучения на уровне 0,1 от предельно допустимой дозы) возможно применение единого для всех условий облучения градуировочного коэффициента.

КИД использовался в сличении средств индивидуального дозиметрического контроля ИФВЭ, ИАЭ, ЛИЯФ и ЦЕРН, проведенных в 9 опорных полях ИФВЭ, созданных на основе радионуклидных источников нейтронов и за биологической защитой протонного синхротрона. Из всех используемых в сравнении дозиметров, предназначенных для оперативного ИДК, результаты, полученные с помощью КИД, оказались наиболее близки к опорным значениям максимальной эквивалентной дозы и за исключением одного поля находятся в пределах 30% от их значений.

В диссертации предложены пути дальнейшей модернизации дозиметра, связанные, в основном, с изменениями конструкции и делающие его более удобным в эксплуатации. Например, размещение детекторов пар "а" и "i" на одном уровне для возможности использования в дозиметре карт с постоянно находящимися в них ТЛД, раздельное размещение поглощающего тепловые нейтроны вкладыша и фотоэмульсионного детектора, крепление нижней части кассеты дозиметра к одежде, создание условий для коллимации выходящих из тела и регистрируемых ТЛД пары "i" тепловых нейтронов, увеличение толщины стенок кассеты и др. Модифицированный КИД может являться наиболее перспективным индивидуальным дозиметром на ускорителях и реакторах.

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ описаны опорные поля на основе радионуклидного источника из Cf-252 в шаровых полиэтиленовых замедлителях диаметром 12,7 и 29,2 см. Под опорным полем понимается выделенная в пространстве, условно или физически, область поля ионизирующего излучения с детально исследованными характеристиками, представляющая собой рабочую эталонную меру для проведения метрологических работ. Показана целесообразность создания, наряду с опорными полями на ядерно-физических установках, и опорных полей с использованием радионуклидных источников в замедлителях в качестве эталонов для проведения работ по метрологическому обеспечению радиационного контроля и радиационных исследований.

Описано устройство опорных полей на основе источника из Cf-252 в полиэтиленовых шаровых замедлителях диаметром 12,7 и 29,2 см в составе поверочной установки нейтронных дозиметров и радиометров. Приведены характеристики опорных полей, такие, как энергетическое распределение нейтронов и их средняя энергия, плотность потока, мощности максимальных поглощенной и эквивалентной доз, коэффициент качества нейтронов, мощность поглощенной дозы сопутствующего гамма-излучения и вклад ее в полную эквивалентную дозу. Указанные характеристики относятся к области пространства на расстоянии 1 м от центра источника, расположенного в центре

шара заданного размера на высоте 1,5 м от пола. Поля формируются как прямым, так и рассеянным в помещении излучением. Поле от Cf-252 в шаре диаметром 29,2 см имеет более мягкий энергетический спектр за счет большей доли в нем тепловых нейтронов. Поле от Cf-252 в шаре диаметром 12,7 см имеет большие значения плотностей потока нейтронов и мощностей доз (примерно в три раза).

Изучение характеристик полей проводилось как средствами измерений ОИЯИ, основным из которых является многосферовый спектрометр, так и средствами ИФВЭ, включающими в себя кроме многосферового спектрометра также ЛПЭ-спектрометр, состоящий из сферического тканезквивалентного пропорционального счетчика низкого давления, и аналоговый компонентный бэрметр, состоящий из трех ионизационных камер. Мощность поглощенной дозы гамма-излучения определялась с помощью ТЛД из фтористого лития с Li-7.

Измерения характеристик опорных полей, проведенными различными средствами измерений ОИЯИ и ИФВЭ показало, что максимальное отличие плотности потока нейтронов от среднего значения составляет 5%, мощности эквивалентной дозы 8%.

### Основные результаты работы

1. Экспериментально определены энергетические зависимости чувствительности средств измерений, используемых в радиационном контроле, при различных энергиях в области от тепловых до быстрых нейтронов:

- серийных дозиметров нейтронов ДН-А-1, КДН-2, РУС-У8 и дозиметра на основе счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе;
- детектора тепловых нейтронов LiJ(Eu) в шаровых полиэтиленовых замедлителях;
- образцового всеволнового счетчика ОВС-3М;

2. Экспериментально определен ход энергетической зависимости чувствительности многосферового спектрометра нейтронов с детектором LiJ(Eu) в области промежуточных энергий.

3. Предложен способ оценки погрешностей и оценены погрешности дозиметров нейтронов, используемых в радиационном контроле в полях с различными спектрами на ускорителях и импульсных реакторах ОИЯИ, обусловленные отличиями их энергетических зависимостей чувствительности от энергетической зависимости удельной эквивалентной дозы. Для дозиметра на основе счетчика СНМ-14 в комбинированном замедлителе в диапазоне энергий от 0,4 эВ до 20 МэВ она не превышает 30%, для дозиметра ДН-А-1 в диапазоне энергий от тепловых нейтронов до 20 МэВ - 40%. Показана возможность учета этой погрешности при использовании дозиметров в полях с известными спектрами нейтронов или типичными условиями их формирования.

4. Установлены количественные закономерности появления просчетов дозиметров непосредственного контроля в импульсных полях излучений ускорителей и реакторов ОИЯИ в зависимости от регистрируемых приборами величин и временных режимов работы ЯФУ. Показана возможность оценки и уменьшения погрешностей дозиметров, установления границ их применимости и снижения верхних пределов измерения вследствие просчетов в импульсных полях, основанная на использовании функций, аппроксимирующих просчеты.

5. Разработан и внедрен в РК на синхрофазотроне и импульсных реакторах ОИЯИ дозиметр нейтронов непосредственного контроля на основе активационного детектора из серебра и газоразрядного счетчика в комбинированном замедлителе, показания которого не зависят от импульсности излучения, что позволило существенно (в десятки и более раз) увеличить верхние значения измеряемых уровней излучения в импульсных полях с большой скважностью.

6. Создан комбинированный индивидуальный дозиметр (КИД), в котором измерение индивидуальных доз нейтронного излучения широкого энергетического диапазона осуществляется с помощью как термомолюминисцентных, так и фотозмульсионных детекторов. Изучены характеристики дозиметра на источниках нейтронов из Cf-252 и Pu-Be, в опорных полях и в полях ускорителей ОИЯИ. КИД использовался в сличениях индивидуальных дозиметров ускорительных центров в опорных полях Института физики высоких энергий и показал наиболее близкие к опорным значениям эквивалентной дозы результаты (в пределах 30%) среди дозиметров, предназначенных для оперативного ИДК. Дозиметр прошел опытную эксплуатацию в ИДК персонала ОИЯИ и предлагается в качестве перспективного индивидуального дозиметра для использования в полях нейтронов широкого энергетического диапазона.

7. Созданы опорные поля нейтронов на основе радионуклидного источника Cf-252 в шаровых полиэтиленовых замедлителях диаметром 12,7 и 29,2 см и изучены их метрологические характеристики. Применение опорных полей для поверки и калибровки ряда дозиметров нейтронов, используемых на ускорителях и реакторах, позволило существенно снизить их погрешности по сравнению со стандартными методами поверки по радионуклидным источникам.

### Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гелев М.Г., Комочков М.М., Мишев И.Т., Мокров Ю.В., Салацкая М.И. Некоторые характеристики индивидуального дозиметра на основе пленки с эмульсией типа "К". - Атомная энергия, т.42, вып.1, с.55-56, 1977.

2. Алейников В.Е., Бескровная Л.Г., Комочков М.М., Мокров Ю.В., Прусаченков С.П., Салацкий В.И. Экспериментальное определение чувствительности дозиметра ДН-А-1 и сцинтилляционного детектора LiJ(Eu) в шаровых полиэтиленовых замедлителях в области энергий нейтронов 30 кэВ. Сообщение ОИЯИ Р16-12819, Дубна, 1979.

3. Алейников В.Е., Архипов В.А., Бескровная Л.Г., Комочков М.М., Мокров Ю.В. Чувствительность детекторов тепловых нейтронов с замедлителями. - Приборы и техника эксперимента, N1, с. 49-53, 1983.

4. Бучнев В.Н., Зубков Н.В., Козловский К.И., Комочков М.М., Кучер А.М., Мокров Ю.В. Определение чувствительности СНМ-14 с комбинированным замедлителем при энергии нейтронов 14,2 МэВ. Сообщение ОИЯИ Р3-85-428, Дубна, 1985.

5. Бучнев В.Н., Комочков М.М., Мокров Ю.В. Энергетические зависимости чувствительности некоторых дозиметров нейтронов в диапазоне энергий от 1 эВ до 4 кэВ. Сообщение ОИЯИ Р16- 85-802, Дубна, 1985.

6. Комочков М.М., Мокров Ю.В. Энергетические зависимости чувствительности некоторых нейтронных дозиметров в диапазоне энергий от 17 кэВ до 1 МэВ. Сообщение ОИЯИ Р3-86-184, Дубна, 1986.

7. Бучнев В.Н., Комочков М.М., Мокров Ю.В. Энергетические зависимости чувствительности и погрешности некоторых дозиметров нейтронов. Сообщение ОИЯИ Р16-86-491, Дубна, 1986.

8. Aleinikov V.E., Bamblevskij V.P., Komochkov M.M., Krylov A.R., Mokrov Yu.V. and Timoshenko G.N. Referens Neutron Fields for Metrology of Radiation Monitoring. - Radiation Protection Dosimetry, Vol.54, No.1, pp.57-59(1994).

9. Комочков М.М., Мокров Ю.В. Индивидуальный дозиметрический контроль в ОИЯИ. Сообщение ОИЯИ Р16-94-178, Дубна, 1994.

Рукопись поступила в издательский отдел  
25 января 1999 года.