

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 539.1.03 +
621.384.6

Ц-76

16-88-262

ЦОВБУН

Владимир Иванович

**РАДИАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
НА УСТАНОВКАХ, УСКОРЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОНЫ
И ТЯЖЕЛЫЕ ИОНЫ**

Специальность: 01.04.01 - экспериментальная физика

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна 1988

Работа выполнена в Отделе новых методов ускорения и Отделе радиационной безопасности и радиационных исследований Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник

Копылов-Свиридов
Виктор Алексеевич

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Зайцев
Лев Николаевич
Сычев
Борис Сергеевич

Ведущее научно-исследовательское учреждение -
Институт ядерных исследований АН СССР (Москва).

Защита диссертации состоится "___" _____ 1988 г.
в _____ часов на заседании специализированного Совета Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований, Дубна Московской области, конференц-зал ЛВЭ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь специализированного Совета

М.Ф.Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы определяется продолжающимся интенсивным развитием ускорительной техники для научных исследований, началом широкого использования ускорителей в народном хозяйстве. Масштабы применения электронных ускорителей в промышленности, появление тяжелоионных ускорителей для технологических целей наряду с работой их для исследований требуют нового уровня знаний о полях излучений вблизи ускорителей и на расстояниях от них, параметрах, описывающих ослабление их излучений в веществе.

В Объединенном институте ядерных исследований проектируются и сооружаются тяжелоионные ускорительные комплексы, производятся разработки новых методов ускорения тяжелых ионов. Эти проекты требуют "сопровождения" исследованиями в части радиационной физики, изучением радиационной обстановки на реальных установках и прототипах. Как правило, проектирование уникальных установок происходит в условиях дефицита информации как по исходным данным в части описания источника излучений, так и данным для расчетов радиационных полей и защиты.

На установках с полями излучений короткой длительности не решен ряд проблем анализа излучений.

Цель работы состояла в исследовании дифференциальных выходов излучений из мишеней, бомбардируемых электронами и тяжелыми ионами, изучении полей излучений вблизи ускорительных установок и за радиационной защитой, в том числе путем экспериментальных исследований потерь частиц на реально действующих ускорителях, разработке способа восстановления энергетических распределений полей фотонов короткой длительности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые получены параметры ослабления тормозного излучения с граничной энергией до 10 МэВ при наклонном падении на бетонную защиту.

2. Получены соотношения между мощностью дозы тормозного излучения, прошедшего потолочное перекрытие, и полем излучения на местности вблизи здания электронных ускорителей на энергии до 3 МэВ.

3. Синтезирован новый термоминиофор $BaSO_4(Dy)$, из которого изготовлены термоминиесцентные детекторы, и изучены их основные характеристики.

Объединенный институт
ядерных исследований
БИБЛИОТЕКА

4. Экспериментально и путем моделирования показана принципиальная возможность восстановления энергетических распределений полей фотонов короткой длительности с граничной энергией до 1,5 МэВ.

5. Экспериментально получены угловые и энергетические распределения нейтронов, вылетающих из мишеней, бомбардируемых тяжелыми ионами ^{48}Ti ($C, \chi n$) 4,2 МэВ/н, ^{58}Ni ($C, \chi n$) 6,2 МэВ/н, ^{58}Ni ($Si, \chi n$) 6,6 МэВ/н.

Практическая значимость работы иллюстрируется внедрением результатов диссертационных исследований в проектные работы Государственного союзного проектного института (ГСПИ). Они использованы ГСПИ в качестве методик расчета радиационных полей и защиты электронных и тяжелоионных ускорителей, в частности ускорителей тяжелых ионов для ОИЯИ. Данные, приведенные в диссертации, использованы в единых санитарных правилах размещения и эксплуатации радиационно-технологических установок с ускорителями электронов (ЕСП-электрон) Совета Экономической Взаимопомощи и национальных санитарных правил размещения и эксплуатации ускорителей электронов с энергией до 100 МэВ.

Автор выносит на защиту:

1. Результаты выполненных расчетных исследований ослабления тормозного излучения с граничной энергией до 10 МэВ при наклонном падении на бетонную защиту, поля излучения на местности вблизи зданий электронных ускорителей на энергии до 3 МэВ, двойных дифференциальных выходов тормозного излучения из вольфрамовой мишени, бомбардируемой электронами с энергией 10 МэВ.

2. Результаты экспериментальных исследований полей излучений вблизи установок, ускоряющих электроны, и сравнение с расчетами.

3. Экспериментальные данные по угловым и энергетическим распределениям нейтронов, вылетающих из мишеней, бомбардируемых тяжелыми ионами, и вблизи циклотронов тяжелых ионов.

4. Разработку способа восстановления энергетических распределений полей фотонного излучения короткой длительности с граничной энергией до 1,5 МэВ с помощью термостимулюлюцентных детекторов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на семинарах комиссии "Радиационная защита и работа в условиях высокого уровня радиации" при Совете по проблемам ускорения заряженных частиц АН СССР (Новосибирск, 1974 г.;

Одесса, 1975 г.; Протвино, 1977 г.; Сухуми, 1978 г.; Дубна, 1979 г.; Харьков, 1984 г.), на I Всесоюзной конференции по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок (Москва, МИФИ, 1974 г.), на УШ (Протвино, 1982 г.), IX (Дубна, 1984 г.) Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц, на IУ Отраслевой конференции по организации и методам дозиметрического контроля условий труда (Обнинск, 1979 г.), на УШ Всесоюзном совещании по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующих излучений (Обнинск, 1987 г.).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 14 препринтах и сообщениях ОИЯИ, журналах Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, Letters; Radiation Protection Dosimetry.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Материал работы, изложенной на 152 страницах машинописного текста, включает 57 рисунков, 19 таблиц. Список литературы насчитывает 198 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении отмечается актуальность радиационных исследований на электронных и тяжелоионных ускорительных установках, сформулированы основные цели: развитие методов оценок радиационных полей и защиты на электронных и ионных ускорительных установках путем проведения экспериментальных и расчетных исследований; поиск возможности восстановления энергетических распределений полей фотонов короткой длительности. Отмечена научная новизна и практическая значимость исследований. Кратко изложено содержание диссертации.

Расчеты параметров полей излучений и радиационной защиты электронных ускорителей

В первой главе выполнен литературный обзор данных по выходу излучений из мишеней, бомбардируемых электронами, и ослаблению их в защитных материалах. Отмечены отсутствие информации об ослаблении наклонно падающего на защиту тормозного излучения, проблема расчета защиты потолочного перекрытия, связанная с оценкой поля излучения на местности вблизи здания ускорителя электронов, и важность получения дифференциальной информации о выходе излучения из мишеней. Это явилось стимулом проведения соответствующих исследований.

Изучение /1/ ослабления тормозного излучения с граничной энергией 0,5, 1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 МэВ выполнено известным способом "конкурирующих линий" в 10- и 12-групповом приближении для обычного бетона. Рассматривалось четыре варианта взаимного расположения защиты и падающего на мишень пучка электронов. Часть информации для лобовой защиты представлена на рис.1.

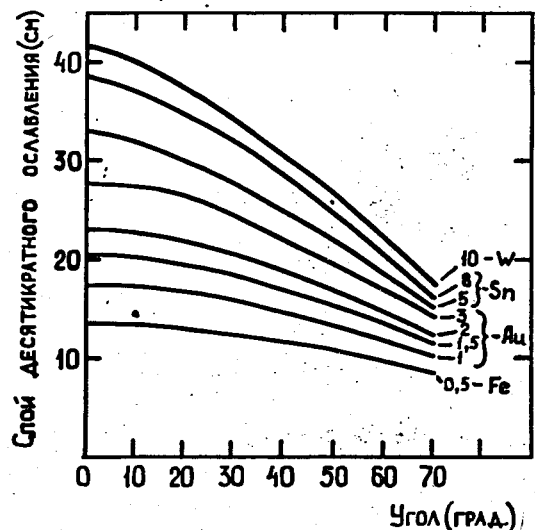


Рис.1. Слой десятикратного ослабления тормозного излучения с граничной энергией до 10 МэВ в обычном бетоне при наклонном падении на лобовую защиту. Обозначения у кривых - энергии электронов и материал мишени.

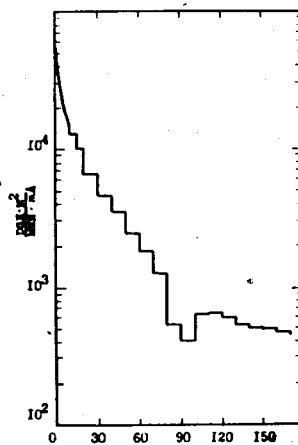
Задача /2,3/ расчета поля излучения на местности от радиации, прошедшей через потолочное перекрытие зданий (SKYSHINE), решалась методом Монте-Карло и, в основном, в приближении однократного рассеивания от элементов воздушного рассеивателя на пути мишень-место регистрации в отсутствие защитного потолочного перекрытия. Пространственное распределение дозы излучения на местности имеет характерный "теневой" максимум вблизи стены здания. Расчет методом Монте-Карло показал, что в максимуме распределения дозы однократно рассеянные кванты составили около 70 % дозы. Показано, что деформация пространственного и энергетического распределения тормозного излучения защитным перекры-

тием не уменьшает отношение мощностей доз за защитным перекрытием над мишенью к дозе в максимуме на местности более чем в 1,5 раза. Как правило, установка защитного перекрытия несколько увеличивает его.

Эта оценка позволила использовать данные для ускорителей без защитного перекрытия и для зданий, имеющих плоское защитное перекрытие. В таблице I приведены отношения мощностей доз над мишенью за перекрытием к максимумам мощностей доз на местности для ускорителей с энергией от 0,5 до 3 МэВ и различных размеров зданий.

Программный комплекс прохождения электрон-фотонных каскадов в веществе ВТЛАН-16 был адаптирован к ЭВМ СДС-6500^{4/4}. На рис.2 и 3 приведены рассчитанные угловые распределения мощности дозы и спектры тормозного излучения, вылетающего из вольфрамовой мишени ($3,1\text{г/см}^2$) при бомбардировке её электронами с энергией 10 МэВ.

Рис.2. Угловое распределение мощности поглощенной дозы тормозного излучения в воздухе вблизи вольфрамовой мишени, бомбардируемой электронами с энергией 10 МэВ.



Угол, градус

Рис.3. Спектры тормозного излучения из вольфрамовой мишени, бомбардируемой электронами с энергией 10 МэВ.

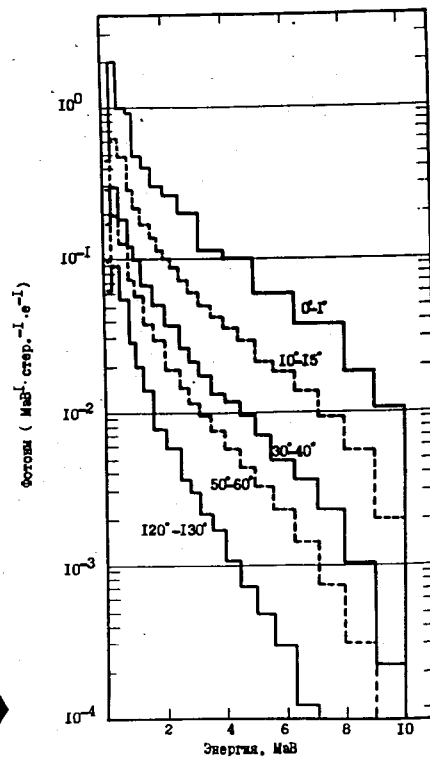


Таблица 1. Отношение мощностей доз над мишенью на уровне потолочного перекрытия к мощности доз в максимуме на местности (умножить на 10^3)

| Энергия электронов, МэВ | Высота здания, м | Расстояние до защитной стены, м | | | | |
|-------------------------|------------------|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 |
| 0,5 | 3 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| | 4 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 |
| | 6 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| | 8 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| | 10 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| | 4 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| | 6 | 2 | 1 | 0,8 | 0,8 | 0,9 |
| | 8 | 1 | 1 | 0,9 | 0,8 | 0,8 |
| | 10 | 1 | 1 | 0,9 | 0,7 | 0,8 |
| 1,5 | 3 | 14 | 5 | 4 | 5 | 5 |
| | 4 | 10 | 5 | 3 | 3 | 3 |
| | 6 | 6 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| | 8 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| | 10 | 4 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 2 | 3 | 25 | 7 | 5 | 5 | 5 |
| | 4 | 13 | 6 | 4 | 4 | 3 |
| | 6 | 10 | 6 | 4 | 4 | 3 |
| | 8 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| | 10 | 5 | 4 | 3 | 3 | 2 |
| 3 | 3 | 35 | 10 | 7 | 5 | 5 |
| | 4 | 28 | 10 | 7 | 4 | 3 |
| | 6 | 15 | 9 | 6 | 4 | 3 |
| | 8 | 11 | 7 | 5 | 4 | 3 |
| | 10 | 8 | 6 | 4 | 3 | 3 |

Таблица 2. Экспозиционная доза за импульс излучения, микрорентген/импульс

| № точки | Измерение | Расчет |
|---------|-------------|--------|
| 1 | 12 ± 3 | 23 |
| 2 | 19 ± 5 | 18 |
| 3 | 4 ± 1 | 9 |
| 4 | 3,5 ± 0,8 | 6,2 |
| 5 | 0,8 ± 0,2 | 1,6 |
| 6 | 0,66 ± 0,16 | 1,5 |
| 7 | 0,54 ± 0,16 | 1,0 |
| 8 | 0,46 ± 0,12 | 1,1 |
| 9 | 0,46 ± 0,12 | 1,0 |

В приложении в сжатой форме представлен справочный материал для быстрых оценок радиационных полей и радиационной защиты электронных ускорителей на энергии до 100 МэВ, основанный на современной информации, в том числе на данных, полученных в настоящей главе.

Экспериментальные исследования полей излучений вблизи прототипа коллективного ускорителя электронно-ионных колец

Коллективный ускоритель тяжелых ионов состоит из инжектора электронов, генератора заряженных тороидов и ускорителя электронных колец. Вторая глава посвящена изучению прототипа установки /5,7/ с целью получения функции источника излучений, измерения и оценок радиационных полей вблизи ней.

Инжектор электронов прототипа - СИЛУНД ускорял электроны до энергии 1,6 МэВ, ток около 500 А, длительность импульса тока около 30 наносекунд, частота 0,5 Гц. На рис.4 представлено пространственное распределение мощности дозы тормозного излучения вблизи ускорителя, измеренное с помощью термоллюминесцентных детекторов (ТЛД). Анализ показывает, что источниками излучения являются межсекционные промежутки ускорителя и электропровод. Осциллограммы тока пучка электронов с индукционных датчиков между секциями позволили определить потери электронов по разности площадей под осциллограммами. Расчеты мощностей доз, выполненные в предположении равномерных потерь электронов между секциями, представлены на рис.4. Они согласуются с измерениями в пределах фактора 1,5.

По показаниям детекторов, расположенных над электропроводом, были восстановлены потери электронов в нем путем решения системы интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода методом статистической регуляризации:

$$(D+\delta)_{i=1 \pm g} = \int_0^{z_{max}} \frac{P(\theta_i, z)}{R_i^2(z)} \cdot S(z) \cdot dz, \quad (1)$$

где $S(z)$ - искомое распределение потерь электронов; $P(\theta_i, z)$ - угловое распределение мощности дозы тормозного излучения; θ_i - угол, под которым виден детектор из точки z ; $R_i(z)$ - расстояние от точки z до детектора; $(D+\delta)_i$ - показание и погрешность показания i -го детектора; t - время облучения. На рис.5 представлены распределения потерь электронов в дифференциальном и интегральном виде.

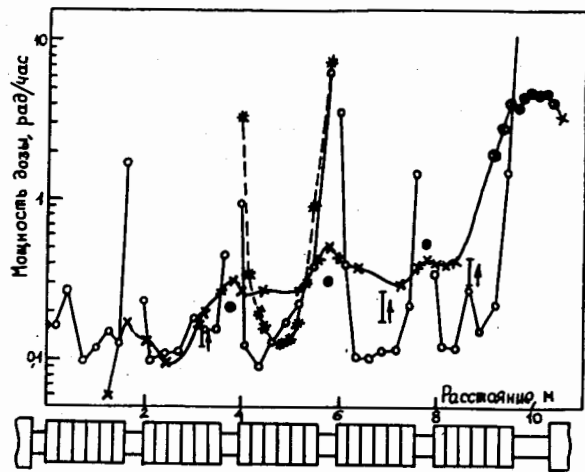


Рис.4. Пространственное распределение мощностей доз на ускорителе СИЛУНД: \circ - на поверхности ускоряющих секций; \times - на высоте 50 см от оси ускорителя; \odot - показания детекторов, по которым восстанавливались потери пучка электронов; \bullet - расчетные оценки мощностей доз над прямолинейными промежутками на высоте 50 см.

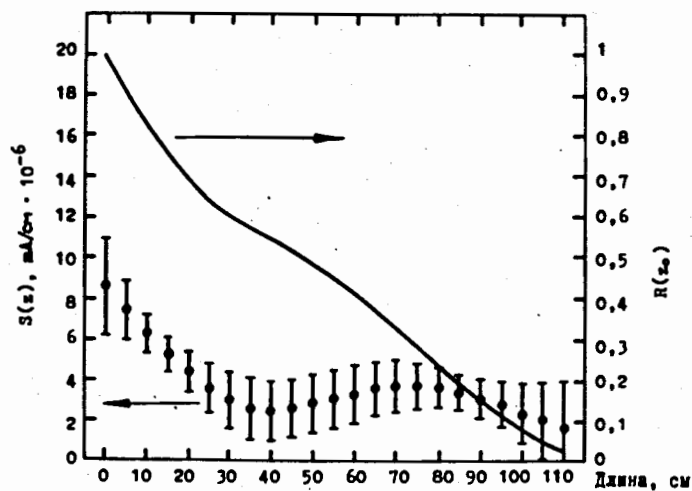


Рис.5. Распределения потерь электронов по длине электропровода.

Полученные представления о потерях электронов на инжекторе были использованы при сравнении оценок и измерений поля излучения перед и за защитным барьером в экспериментальном зале, где располагался СИЛУНД. Для части зала за защитой, рис.6, решалась задача отражения излучения от стен и потолка зала с использованием литературных данных по коэффициентам альбедо. Сравнение представлено в таблице 2. Согласно в пределах фактора 2 - 2,5 отражает степень достоверности прогноза радиационной обстановки на реальном ускорителе, о котором есть информация как об источнике излучения с оцененными потерями частиц.

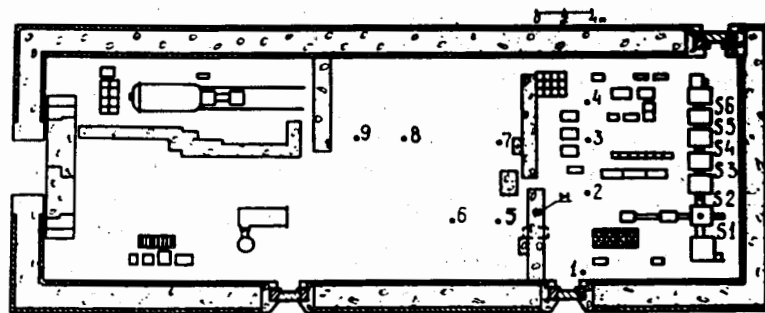


Рис.6. План экспериментального зала: I - места измерений; S_i - локализация источников излучений.

Генератор электронно-ионных колец - адгезатор - это магнитная система, сжимающая инжектированное кольцо примерно в 10 раз до радиуса 4 см, при этом вращательная энергия электронов возрастает до 16 МэВ.

Режимы настройки генерации колец имеют специфическую функцию потерь электронов, которую необходимо знать для расчетов радиационных полей и защиты.

Серия измерений пространственного распределения доз тормозного излучения была выполнена с помощью ТЛД в различных режимах работы. Было выяснено, что в режиме настройки захвата инжектируемого пучка незахватываемая часть пучка и электроны из кольца, после его расширения, сбрасываются на инфлектор преимущественно в направлении инжекции. В характерном настроенном режиме захвата, сжатия и роспуска сжатого электронного кольца в процессе роспуска в результате резонансного развала кольца происходит преимущественная высадка электронов на инфлектор с энергией около 5 МэВ в вертикальном направлении. Оценена потеря электро-

нов из сжатого кольца с энергией 16 МэВ в результате рассеяния на остаточном газе (менее 2%). Установлено, что при выводе сжатого кольца как целого из адгезатора его сопровождают электроны с энергией несколько сотен кэВ, образовавшиеся в результате обдирки молекул остаточного газа.

Восстановление энергетических распределений гамма- и тормозного излучения короткой длительности

Анализ энергетических распределений полей фотонов короткой (наносекунды) длительности в диапазоне выше нескольких сотен кэВ до примерно 1,5 МэВ относится к нерешенным методическим задачам. Глава 3 посвящена поиску решения этой задачи с помощью термоллюминесцентных детекторов^{8,10,14}.

Математическим методом восстановления энергетических распределений являлся упомянутый в главе 2 метод статистической регуляризации. Задача сводилась к поиску функций чувствительности ТЛД, имеющих существенно различный характер в заданном диапазоне энергий. Естественно было включить в набор дозиметр LiF в тефлоне. С помощью поглотителей различной толщины можно организовать функции чувствительности, близкие к пороговым. Набор этих функций чувствительности для ТЛД LiF за свинцовыми поглотителями был реализован, рассчитан и проверен с помощью изотопных гамма-источников $Cd-109$, $Am-241$, $Tm-170$, $Co-57$, $Cz-51$, $Cs-137$, $Co-60$.

Однако все функции имели пониженную чувствительность для энергий менее 300 кэВ, что не позволяло восстанавливать спектры в широком диапазоне энергий. Включение в набор функции чувствительности ТЛД $CaSO_4(Dy)$ с большей чувствительностью к "мягким" гамма-квантам, как показало моделирование, не улучшало заметно положение. Необходим термоллюминофор с большим средним атомным номером.

Был изготовлен термоллюминофор $BaSO_4(Dy)$ по технологии, обычно применяемой для изготовления $CaSO_4(Dy)$. Из термоллюминофора (порошка) были изготовлены детекторы путем смешивания с термостойким силиконовым лаком с последующей термообработкой. Кривая термовысвечивания имела пик при 145°C. Были произведены расчеты и измерения функции чувствительности $BaSO_4(Dy)$ - детекторов на изотопных источниках. Набор функций чувствительности, который использовался для демонстрации возможности восстановления спектров, представлен на рис.7.

Демонстрация возможностей восстановления производилась путем численного моделирования восстановления заранее заданных спек-

ров фотонов, в лабораторных условиях, где моделировался спектр изотопного источника $Cs-137$, ослабленного слоем железа толщиной 4 длины свободного пробега, а также на ускорителе электронов ЛИУ-3000. Параметры ЛИУ-3000: энергия электронов 1,5 МэВ, ток электронов 60 А, длительность тока 200 наносекунд, частота 1 Гц.

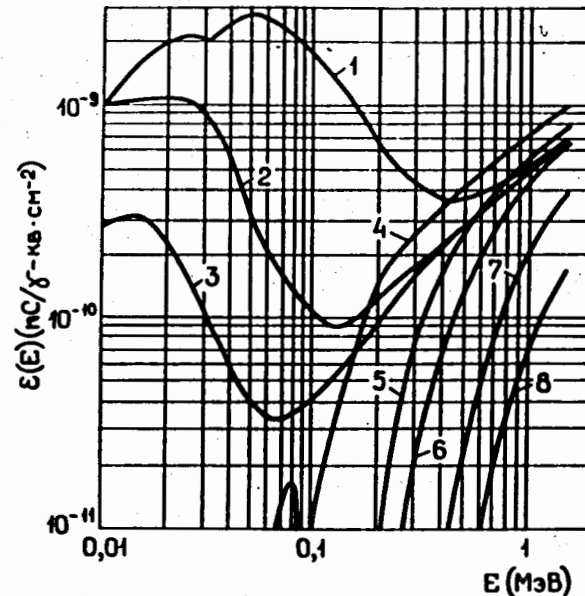


Рис.7. Функции чувствительности детекторов. 1 - $BaSO_4(Dy)$, 2 - $CaSO_4(Dy)$, 3 - LiF в тефлоне; детекторы LiF за барьерами свинца: 4 - 0,53, 5 - 4,31, 6 - 9,05, 7 - 21,8; 8 - 39,54 г/см² в удельных единицах показаний считывающего прибора.

Мишень медная, сборка детекторов устанавливалась под углом 0°.

Численное моделирование производилось на примере спектров $Co-60$, ослабленного слоем железа толщиной 4 длины свободного пробега, и спадающего спектра тормозного излучения электронов с энергией 1,5 МэВ, бомбардирующих алюминиевую мишень. Исследовалась устойчивость восстановления относительно возможных погрешностей показаний детекторов. Моделирование показало приемлемое воспроизведение спектров. На рис.8 и 9 представлены результаты экспериментального восстановления спектров в лабора-

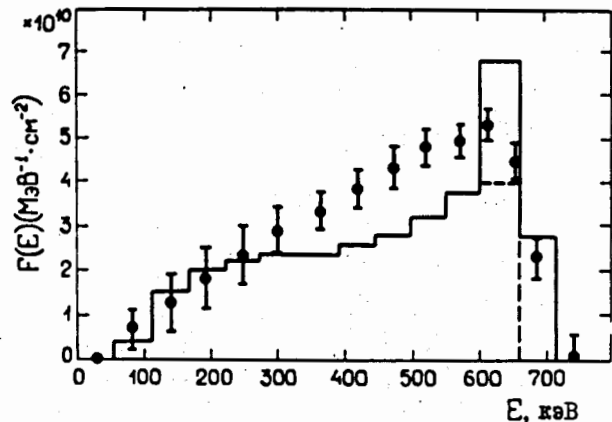


Рис.8. Экспериментально восстановленный спектр излучения $Cs-137$, ослабленного железным барьером толщиной 4 длины свободного пробега.

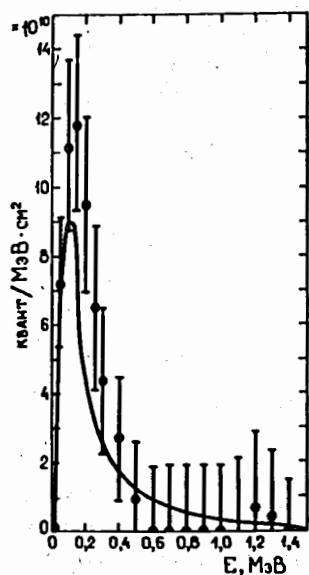


Рис.9. Восстановленный спектр тормозного излучения электронов с энергией 1,5 МэВ, бомбардирующих медную мишень на ускорителе ДИУ-3000.

торных условиях и на ускорителе ДИУ-3000. Расчет спектра $Cs-137$ за железным барьером выполнен по программе ETRAK-16/A. Спектр тормозного излучения с максимумом, известный по данным литературы (Edelvaak E.A. et al. Health Phys., 4, 1-15, 1960), был реализован на ускорителе.

Восстановленные спектры воспроизводят форму реализованных в лабораторных условиях и на ускорителе спектров. Разница дифференциальных значений спектров в одном энергетическом интервале не превышает 30%. Спектры согласуются в пределах двух стандартных отклонений от значений восстановленных спектров.

На основе проведенного моделирования, а также экспериментального восстановления известных спектров излучения показана принципиальная возможность восстановления гладких спектров гамма- и тормозного излучения короткой длительности с граничной энергией до 1,5 МэВ.

Поля излучений вблизи ускорителей тяжелых ионов

В четвертой главе на основе литературных данных сделан вывод, что тяжелоионные ускорители являются уникальными установками, обеспечивающими, в частности, получение тех данных, которые решающим образом повлияют на физические основы расчетов радиационных полей и защиты. В условиях дефицита информации по сечениям образования нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях целесообразно использовать упрощенные представления для получения аппроксимаций, применяемых в широком диапазоне энергий ионов и для широкого набора ядер снарядов и ядер мишеней с точностями оценок доз за защитой в пределах фактора 2 - 3.

Предложена [9, 12] аппроксимация двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в ядро-ядерных взаимодействиях:

$$\frac{d^2\sigma}{dE \cdot d\Omega} = \frac{\sigma_n \cdot \sqrt{E(E+E_0-2\sqrt{E \cdot E_0} \cdot \cos\theta)}}{4\pi T} \cdot e^{-\frac{E+E_0-2\sqrt{E \cdot E_0} \cdot \cos\theta}{T}} \quad (2)$$

где E - энергия нейтрона; θ - угол вылета в лабораторной системе; $E_0 = \frac{A_i^2}{(A_s + A_i)^2} \cdot W$, A_s и A_i - атомный вес мишени и снаряда; W - энергия иона в МэВ/нуклон; $T = \sqrt{10 E^* / A}$ - температура; $A = A_s + A_i$, $E^* = \frac{A_s}{A_s + A_i} \cdot W \cdot A_i - \Delta M$ - энергия возбуждения; ΔM - дефект масс для компаунда A ; $\bar{n} = \frac{E^*}{E_n + \Sigma}$ - средняя множественность рождения нейтронов; E_n - энергия связи. Сечения (2) проверялись на экспериментальной и расчетной информации, имеющейся в литературе в диапазоне энергий ионов до 100 МэВ/нуклон. Очерчена достаточно обширная область применимости аппроксимации (2).

Экспериментальная информация о дифференциальных выходах нейтронов из мишеней, бомбардируемых тяжелыми ионами, получена [11, 13] на циклотроне У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.

Детекторами излучений были датчик тепловых нейтронов ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, помещавшийся в полиэтиленовые сферы диаметром 7,6, 12,7, 25,4, 30,5 см, а также углеродный ${}^{12}\text{C}(n,2n){}^{13}\text{C}$ -детектор. Энергетические распределения нейтронов получались по показаниям детекторов методом статистической регуляризации. Доза вычислялась интегрированием спектров с удельной эквивалентной дозой нейтронов. Угловые распределения эквивалентной дозы нейтронов и энергетические распределения были получены для ионов ${}^{48}\text{Ti}$ с энергией 4,2 МэВ/нуклон, падающих на углеродную мишень, ионов ${}^{58}\text{Ni}$ (6,2 МэВ/нуклон), падающих на углеродную мишень, и ионов ${}^{58}\text{Ni}$ (6,6 МэВ/нуклон), падающих на медную мишень. На рис. 10 - 12 представлены измеренные угловые и энергетические распределения.

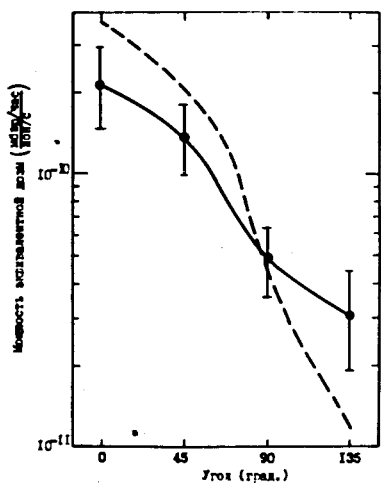


Рис. 10. Угловое распределение мощности эквивалентной дозы нейтронов и аппроксимация. Ион Ti^{48} , 4,2 МэВ/н, графитовая мишень.

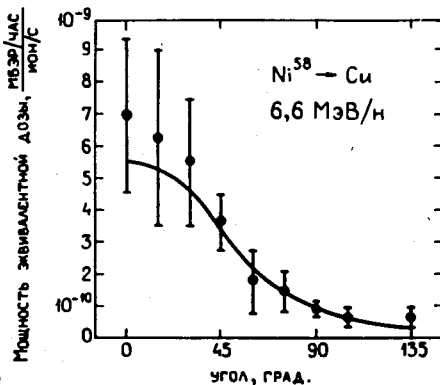


Рис. 11. То же, что рис. 10. Ион Ni^{58} , 6,6 МэВ/н, медная мишень.

Интегральные распределения, представленные на рис. 12, 13 кривыми, есть

$$R(E) = \frac{\int_E^\infty \phi(E) \cdot h(E) \cdot dE}{\int_0^\infty \phi(E) \cdot h(E) \cdot dE},$$

где $h(E)$ - удельная эквивалентная доза.

На рис. 13 представлен набор спектров нейтронов от "жесткого" до "мягкого", встречающихся на ускорителях тяжелых

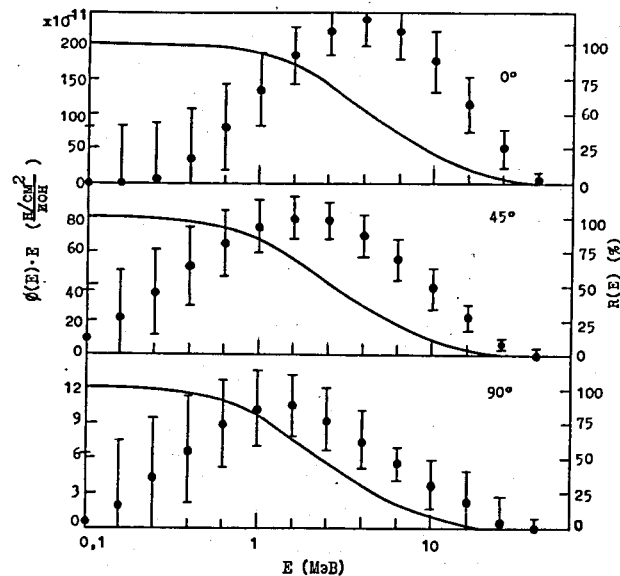


Рис. 12. Энергетические распределения нейтронов. Ni^{58} , 6,2 МэВ/н, графитовая мишень.

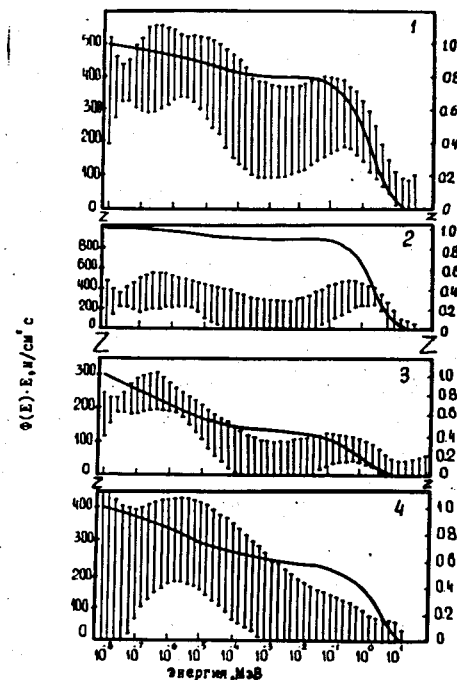


Рис. 13. Спектральные распределения флюенса нейтронов и энергетические распределения эквивалентной дозы вблизи циклотронов тяжелых ионов.

ионов с энергией до 10 МэВ/нуклон. Эта информация позволяет оценить адекватность показаний нейтронных дозиметров, применяемых в радиационном контроле, эквивалентной дозе нейтронов.

Заключение

Основные результаты и выводы диссертации сформулированы следующим образом.

1. Расчетным моделированием прохождения излучения в веществе получены:

- параметры ослабления в обычном бетоне тормозного излучения электронных ускорителей на энергии 0,5–10 МэВ при наклонном падении на защиту;
- коэффициенты, связывающие мощность дозы тормозного излучения электронных ускорителей на уровне потолочного перекрытия и максимум мощности дозы поля излучения на местности вблизи здания ускорителя, образованного вышедшим через потолочное перекрытие излучением;
- угловые распределения мощности дозы и двойные дифференциальные спектры тормозного излучения, испускаемого толстой вольфрамовой мишенью при бомбардировке ее электронами с энергией 10 МэВ.

2. Экспериментально изучена функция распределения потерь электронов инжектора СИЛУНД прототипа коллективного ускорителя тяжелых ионов и поле излучения вблизи инжектора.

В поле излучения реально действующего ускорителя СИЛУНД экспериментально проверен расчетный прогноз радиационной обстановки перед и за барьерной защитой с использованием полученных данных о распределении потерь электронов и известных параметров для инженерных расчетов с согласием в пределах фактора 3.

Экспериментально изучены основные характеристики генератора электронно-ионных колец – адгезатора как источника тормозного излучения в режимах настройки и генерации колец.

3. Разработан и изготовлен новый термоминесцентный детектор с повышенной чувствительностью к гамма-излучению с энергией до 300 кэВ $BaSO_4(Dy)$, изучены его основные дозиметрические свойства, измерены на изотопных источниках гамма-излучения и предложены рабочие формулы для расчета функций чувствительности термоминесцентных детекторов за различными поглотителями.

4. Экспериментально и путем моделирования показана принципиальная возможность восстановления гладких энергетических распределений фотонов в энергетическом диапазоне до 1,5 МэВ,

в том числе импульсного излучения короткой длительности, с помощью термоминесцентных детекторов.

5. Показана возможность простой аппроксимации двойных дифференциальных сечений выхода нейтронов при взаимодействии тяжелых ионов с энергией до 100 МэВ/нуклон и ядер, позволяющей с приемлемой достоверностью оценивать радиационные поля и защиту тяжелоионных ускорителей.

6. Экспериментально получены угловые распределения эквивалентной дозы нейтронов, испускаемых мишенями при бомбардировке их тяжелыми ионами: $^{78}Fe(C, \chi n)$ 4,2 МэВ/нуклон; $^{58}Ni(C, \chi n)$ 6,2 МэВ/нуклон; $^{58}Ni(Cu, \chi n)$ 6,6 МэВ/нуклон.

7. Экспериментально изучены энергетические распределения нейтронов вблизи тяжелоионных ускорителей в прямой видимости мишеней и за защитой, позволяющие оценивать адекватность средств дозиметрического контроля в реальных полях нейтронов.

Материалы, в которых отражены основные положения диссертации:

1. Цовбун В.И. Бетонная защита электронных ускорителей на энергии 0,5–10 МэВ. ОИЯИ, Р16-7834, Дубна, 1974.
2. Цапке Д., Цовбун В.И. Оценка радиационных полей вблизи зданий электронных ускорителей на энергии 0,5–3 МэВ, образованных тормозным излучением, прошедшим через легкие потолочные перекрытия. ОИЯИ, Р16-9481, Дубна, 1976.
3. Цовбун В.И. Оценка полей радиации вблизи зданий электронных ускорителей на энергии 0,5–3 МэВ с плоскими потолочными перекрытиями. ОИЯИ, Р16-10390, Дубна, 1977.
4. Цовбун В.И. Расчет спектрально-углового распределения тормозного излучения электронов с энергией 10 МэВ, падающих на толстую вольфрамовую мишень. ОИЯИ, Р16-11132, Дубна, 1977.
5. Долбилов Г.В., Цовбун В.И. Измерения пространственного распределения дозы тормозного излучения на инжекторе электронов СИЛУНД коллективного ускорителя тяжелых ионов. ОИЯИ, Р16-11934, Дубна, 1978.
6. Комендантова Г.А., Комочков М.М., Салацкая М.И., Цовбун В.И. Исследование адекватности показаний индивидуальных фотоэмульсионных дозиметров эквивалентной дозе нейтронов вблизи ускорителей тяжелых ионов. ОИЯИ, Р16-12858, Дубна, 1979. Также в кн. "Дозиметрия, радиометрия ионизирующих излучений и радиационная безопасность". Материалы конференции, ЦНИИАтоминформ, Москва, 1980.

7. Цовбун В.И. Проверка прогноза поля тормозного излучения перед и за барьерной защитой СИЛУНДа - инжектора электронов коллективного ускорителя тяжелых ионов. ОИЯИ, I6-80-868, Дубна, 1980.
8. Комочков М.М., Цовбун В.И. Зависимость чувствительности термолуминесцентных детекторов, помещенных за различными поглотителями, от энергии гамма-излучения. ОИЯИ, P16-81-330, Дубна, 1981.
9. Цовбун В.И. Аппроксимация двойных дифференциальных сечений образования нейтронов в реакциях с тяжелыми ионами при энергии до 100 МэВ/нуклон. ОИЯИ, P16-82-629, Дубна, 1982.
10. Хеннигер Ю., Хо Ги Хон, Цовбун В.И. Энергетические зависимости эффективности регистрации гамма-излучения термолуминесцентными детекторами $CaSO_4(Dy)$ и $BaSO_4(Dy)$. ОИЯИ, P16-83-90I, Дубна, 1983. Также: Henniger J., Gi Hon Ho, Tsvoboon V.I. Response Functions of $CaSO_4(Dy)$ and $BaSO_4(Dy)$ thermoluminescent detectors to gamma radiation. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Letters, 86(2) 105-110, 1984.
11. Череватенко А.П., Цовбун В.И. Угловые и энергетические распределения флюенса и дозы нейтронов, вылетающих из толстой графитовой мишени, бомбардируемой ионами $Ti-48$ с энергией 4,2 МэВ/нуклон. ОИЯИ, P16-83-34I, Дубна, 1983.
12. Александров В.С. и др. Ускорительный комплекс тяжелых ионов в ОИЯИ. ОИЯИ, P9-83-6I3, Дубна, 1983, с.175.
13. Alejnikov V.E., Cherevatenko A.P., Clapier F.B., Tsvoboon V.I. Neutron radiation field due to 6,6 MeV/amu ^{58}Ni ions bombarding a thick Cu Target. JINR, E16-85-32, Dubna, 1985. Also, Radiation Protection Dosimetry, v.11, No4, p.245-248, 1985.
14. Хо Ги Хон, Цовбун В.И. О возможности восстановления энергетических распределений полей фотонов короткой длительности с граничной энергией ~ 1 МэВ с помощью термолуминесцентных детекторов. ОИЯИ, P16-87-589, Дубна, 1987.

Рукопись поступила в издательский отдел
21 апреля 1988 года.