

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ЛАЗУРИК Валентин Тимофеевич

ВТОРИЧНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЕГО ДОЗИМЕТРИЯ
ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ФОТОНОВ ЧЕРЕЗ ГЕТЕРОГЕННЫЕ СИСТЕМЫ

Специальность 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ХАРЬКОВ - 1992

Работа выполнена в Харьковском государственном университете.
Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Ю. А. Бережной (ХГУ, г. Харьков)
доктор физико-математических наук,
В. В. Токаревский (ИЯИ АН Украины, г. Киев)
доктор физико-математических наук,
Н. Ф. Шульга (ХФТИ, г. Харьков)

Ведущая организация: Радиевый институт им. В. Г. Хлопина
(г. Санкт-Петербург)

Защита состоится " 18 " декабря 1992 г. в 15.00 на
заседании специализированного совета Д 053.06.01 при Харьковском
государственном университете им. А. М. Горького (310108, г. Харьков,
пр. Курчатова, 31, ауд. 301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан " 16 " ноября 1992 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
доцент

В. И. Лапшин

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00814379 (W)

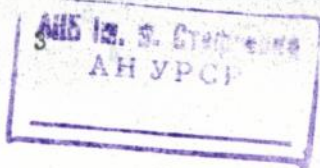
ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема прохождения ионизирующего излучения через вещество является ключевой в прикладной ядерной физике и всегда вызывает большой интерес как теоретиков так и экспериментаторов. Особый интерес в этой проблеме представляют исследования вторичного электронного излучения (ВЭИ), возникающего при прохождении фотонов через гетерогенные системы, т.к. в неоднородных средах наблюдаются специфичные радиационные эффекты, связанные с переносом ВЭИ. Развитие прикладной ядерной физики требует высокой точности теоретических моделей, экспериментальных методов, расчетных и экспериментальных результатов. Для обеспечения этого необходимо адекватное описание изучаемого объекта, а именно - гетерогенные модели. Поэтому исследования общих физических закономерностей ВЭИ в объектах, где гетерогенность структуры существенна, является актуальным направлением.

Научная новизна работы. Изучение характеристик ВЭИ начато еще в 50-х годах, и в настоящее время имеется обширная литература, посвященная экспериментальным и теоретическим исследованиям. Основные результаты этих работ относятся к случаю облучения однородным нормально падающим потоком фотонов плоских однослойных мишеней, находящихся в вакууме, поэтому для корректного описания радиационных эффектов в гетерогенных системах этих данных недостаточно.

Активное использование вычислительной техники в теоретических исследованиях впервые делает возможными исследования физических закономерностей в гетерогенных моделях. При этом первоочередной задачей является разработка эффективных методов расчета, корректных для широкого диапазона параметров объекта, и позволяющих получать наборы данных, достаточные для выявления физических закономерностей (представительные наборы данных).

Корректность расчетной схемы для широкого диапазона параметров объекта достигается за счет использования метода статистического моделирования прохождения и взаимодействия квантов в гетерогенных мишенях (метод Монте-Карло) в минимальных упрощающих предположениях. Возможность получения представительных наборов данных базируется на новых, разработанных автором, методах моделирования. Анализ наборов данных и построение феноменологических моде-



лей позволяет выявить общие закономерности ВЭИ. Установленные закономерности и соотношения используются для описания физических явлений в гетерогенных системах, и предлагаются для экспериментальной проверки в реальных объектах.

Изложению результатов, полученных автором в рамках описанного выше подхода, посвящена настоящая диссертация.

Цель работы. Цели диссертации следующие:

- Создание физических моделей и эффективных расчетных схем, позволяющих получить представительные наборы данных о характеристиках ВЭИ в гетерогенных системах, облучаемых потоком фотонов.
- Выявление общих закономерностей в дозиметрии ВЭИ и построение феноменологических моделей.
- Развитие феноменологических моделей радиационных эффектов для целей дозиметрии и спектрометрии ВЭИ в гетерогенных системах.

Практическая значимость работы. Практическая значимость работы определяется необходимостью разработки гетерогенных моделей для теоретических и экспериментальных исследований, создания методик расчета характеристик ВЭИ в объектах сложной (гетерогенной) структуры, получения соотношений, позволяющих описывать радиационные эффекты в реальных объектах, разработки новых методов контроля характеристик потоков ионизирующих излучений.

Автор выносит на защиту:

1. Теоретические выводы о роли процессов взаимодействия излучения с атомами вещества и образования вторичных частиц в формировании приграничных эффектов. Разработанные методы расчета характеристик ВЭИ и дозиметрических величин в гетерогенных системах.
2. Результаты теоретического исследования переноса вторичных частиц между фазами гетерогенной системы и развитую в диссертации феноменологическую модель этого процесса.
3. Описание распределений поглощенной энергии и объемного заряда в гетерогенных системах при прохождении фотонов. Формулы для проведения расчетов дозиметрических характеристик фотонного излучения в гетерогенных системах.
4. Результаты исследования и соотношения, связывающие характеристики электрофизических эффектов с дозиметрическими характеристиками в гетерогенных системах.

Б. Теоретические выводы и математические выражения, полученные в области радиационной акустики для целей дозиметрии излучения и контроля параметров композиционных материалов.

Апробация работы. Результаты работ, вошедшие в диссертацию, были представлены на Второй, Третьей, Четвертой и Пятой Всесоюзных научных конференциях по защите от ионизирующих излучений ядерно - технических установок (Москва 1978, Тбилиси 1981, Томск 1985, Протвино 1989); Первом и втором всесоюзных совещаниях по вторичному электронному излучению (Ленинград 1975, Ленинград 1983); Всесоюзном семинаре "Применение метода Монте-Карло в задачах переноса частиц в веществе" (Алма-Ата 1982); Седьмом всесоюзном совещании "Методы Монте-Карло в вычислительной математике и математической физике" (Новосибирск 1985); Пятом и Восьмом всесоюзных совещаниях по дозиметрии интенсивных потоков ионизирующих излучений (Москва 1974, Обнинск 1987); Пятом и Шестом Всесоюзных совещаниях по микродозиметрии (Усть-Нарва 1986, Киев 1989), где обсуждались ведущими специалистами в области прикладной ядерной физике по направлению "Прохождение и взаимодействие излучений с веществом".

Кроме этого по прикладным аспектам проводимых теоретических исследований были сделаны доклады на УП и УШ Всесоюзных совещаниях по квантовой акустике и акустоэлектронике (Харьков 1972, Казань 1974); III Всесоюзном симпозиуме по сильноточной импульсной электронике (Томск 1978); Всесоюзном межотраслевом научно-техническом совещании "Разработка, выпуск и применение радиационных толщиномеров" (Рига 1983); Всесоюзном совещании-семинаре "Математическое моделирование и экспериментальное исследование электрической релаксации в элементах интегральных схем" (Гурзуф 1983); Всесоюзном совещании-семинаре "Акустические методы регистрации частиц сверхвысоких энергий в проекте "DUMAND" (Ворошиловград 1984); IY Всесоюзном совещании "Воздействие ионизирующего излучения и света на гетерогенные системы" (Кемерово 1986); 1-й Всесоюзной научно-технической конференции "Применение конструкционных полимерных материалов в машиностроении" (Ворошиловград 1987); У Всесоюзном совещании по активационному анализу и другим радиоаналитическим методам (Ташкент 1987); УI Всесоюзной конференции по физике диэлектриков (Томск 1987); УI Всесоюзном симпозиуме "Люминисцентные

приемники и преобразователи ионизирующего излучения" (Львов 1988).

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 37 работах, опубликованных в центральной научной печати и монографии "Введение в радиационную акустику".

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации (включая рисунки и список литературы) составляет 204 страницы машинописного текста. Диссертация содержит 25 рисунков и список литературы - 160 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна исследования, ставятся цели работы, описывается, как относятся поставленные в диссертации задачи к результатам исследований других авторов в близких научных направлениях.

В первой главе описаны разработанные методы и результаты апробации этих методов при расчете характеристик ВЭИ.

Методы базируются на следующей последовательности операций при моделировании прохождения излучения:

1. Определяется начальный импульс частицы P_0 .
2. Строится траектория движения частицы в неограниченной области содержащей вещество мишени (базовая траектория).
3. Проверяется возможность использования базовой траектории для оценки искомой величины в заданной пространственной области.
4. Вычисляется величина математического ожидания вклада базовой траектории в оценку искомой величины. Расчет проводится на множестве траекторий, образованных трансляцией и/или поворотом базовой траектории вокруг касательной в какой-либо ее точке.

Сравнение операций предлагаемого метода и традиционного показывает, что он один из методов математического ожидания, в котором статистическая оценка при случайной выборке начальной координаты и/или азимутального угла рассеяния заменяется ее математическим ожиданием. Особенностью метода является независимость процедур построения траектории и проверки возможности ее использования в заданной области, что позволяет учесть симметрию вещества и использовать одну траекторию для различных форм мишени. Метод

применим, когда множество траекторий $\langle C \rangle$, реализуемых в рассматриваемой области Q , является подмножеством траекторий $\langle \hat{C} \rangle$ однородной безграничной среды. Это справедливо для выпуклых однородных тел, расположенных в вакууме и гетерогенных систем, образованных однородной средой с поглощающими включениями. Пространственные преобразования траектории и использование весовых множителей позволяют расширить множество $\langle \hat{C} \rangle$ и применять метод для широкого класса гетерогенных систем.

Способ вычисления математического ожидания вклада базовой траектории зависит как от типа регистрируемых величин, так и от вида операции, образующей множество траекторий из базовой. Если траектория задает кусочно - непрерывную и дифференцируемую зависимость параметра частицы от координаты, то возможно, используя трансляцию, построить локальные оценки интегральных характеристик и первых производных потока по этому параметру. Локальные оценки для более высоких производных могут быть получены при одновременном использовании операций трансляции и поворота.

Получены выражения для локальных оценок потока и спектрально - угловых распределений ВЭ. Показано, что использование модели непрерывного замедления при построении траекторий позволяет проводить расчеты с конечной дисперсией.

В пункте 1.2 описаны модификации методов, изложенных в предыдущем разделе. В частности, приведено выражение для расчета плотности переданной энергии $D(\vec{r})$ ВЭИ веществу мишени. Учитывается, что в процессе релаксации переданной энергии от быстрых частиц существенную роль играют электрон - электронные каскады, возникающие за счет катастрофических соударений. Поэтому оценка проводится на наборе ветвящихся траекторий, и вклад траектории определяется суммированием по всем ветвям. Анализ показал, что для корректного расчета $D(\vec{r})$ необходимо детально учитывать элементарные процессы, формирующие как потоки вторичных частиц, так и релаксацию энергии. Полученная оценка позволила построить простую вычислительную схему для расчета локальных значений $D(\vec{r})$.

Рассмотрена модификация метода трансляций, опирающаяся на то, что в однородном пространстве любой отрезок траектории может быть рассмотрен как независимая траектория. В этой модификации

моделируются частицы лишь от моноэнергетичного изотропного источника $\vec{I}(\Omega)$ с максимальной энергией вторичных частиц. Источники частиц с меньшей энергией учитывают, рассматривая отрезки траектории $C_{i,k}^j$ с начальной энергией E_i , равной энергии i -го источника.

Получены соотношения для проведения локальных оценок в случае, когда потоки вторичных частиц формируются не только за счет источников, распределенных в области Q , но и за счет потоков через границу области. Эти соотношения позволяют применять разработанные методы для систем контактирующих областей.

В пункте 1.3 приведены результаты расчета дифференциальных характеристик ВЭИ, выходящего с поверхности плоской мишени, облучаемой гамма-квантами. Расчеты проведены по программам, реализующим разработанные методы трансляции и поворота. Представлены данные об энергетическом распределении ВЭ, выбиваемых излучением ^{152}Gd из медной, серебряной и золотой мишеней, и спектрально-угловые распределения ВЭ из тантала при энергии квантов $E_\gamma = 662$ кэВ для углов регистрации $\theta = 15^\circ, 30^\circ, 60^\circ$. Сравнение полученных результатов показало хорошее их согласие с имеющимися в литературе экспериментальными и расчетными данными.

Получены простые выражения, позволяющие оценить целесообразность применения разработанных методов для решения конкретных задач. Анализ дисперсии результатов указывает на высокое быстродействие методов при их использовании для проведения теоретических исследований ВЭИ в гетерогенных системах. В частности, показано, что применение метода трансляций и поворотов для расчета даже относительно грубых гистограмм распределений ВЭ по углу и энергии ($\Delta E/E \approx 0.1$, $\Delta \theta/\pi \approx 0.1$) дает выигрыш во времени более, чем в 50 раз по сравнению с широко известными программами (ETRAN, POEM, SGETRCON, GEANT).

Во второй главе проведен анализ характеристик ВЭИ и построенные феноменологические модели.

В пункте 2.1 анализируются представительные наборы данных о средних энергиях $\bar{E}^{F,B}$, средних углах вылета $\bar{\theta}^{F,B}$ и выходах $\eta^{F,B}$ ВЭ, выбиваемых из плоских мишеней с атомными номерами Z от 6 до 79, облучаемых однородным нормально падающим потоком квантов с

энергией E_γ от 0.2 до 3 МэВ. При рассмотрении выделяются три области. Первая область определяется такими значениями E_γ и Z , когда источником ВЭ является Комптон - эффект. Анализ показывает, что в этой области интегральные характеристики ВЭИ в основном зависят лишь от рассеивающих свойств вещества мишени. Поэтому, выходы вперед η^F уменьшаются, а выходы назад η^B растут с увеличением Z . В области, когда источником ВЭ является фотоэффект, зависимости выходов $\eta^{F,B}$ от E_γ и Z определяются, в основном, величиной полного сечения фотоэффекта, и поэтому наблюдается возрастание выходов с увеличением Z . Сопоставление зависимостей в этих двух областях указывает на наличие минимума η^F . Качественные выводы и теоретические оценки интегральных характеристик ВЭИ для этих областей хорошо согласуются с имеющимися данными.

Основное внимание уделено третьей области, где находится порог процессов фотоэффекта. Проведен анализ процессов формирования потоков ВЭИ при энергии квантов E_γ близкой к энергии ионизации K - оболочки атома $I_K(Z)$ и обоснована модель описания. В этой модели фотоэлектроны с K - оболочки имеют малую энергию и существенного вклада в поток ВЭ не дают. Образующиеся вакансии в электронной структуре атома приводят к появлению с некоторой вероятностью W электронов Оже, имеющих энергию, близкую к энергии фотоэлектронов с L - и более высоких энергетических оболочек атома. Оценки W в соответствии с формулой Вентцеля показали, что вклад электронов Оже в выходы ВЭ для всех атомов существен.

Для расчета относительной величины скачка $\Delta_\eta(Z)$ выходов ВЭ проведено сравнение средней энергии и угловых распределений электронов Оже и фотоэлектронов с L - и более высоких оболочек атома. Показано, что для этих групп ВЭ можно полагать энергию и угловое распределение одинаковым. В этих предположениях

$$\Delta_\eta(Z) = 1 + (\Delta_{tot}(Z) - 1) \cdot W \quad (1)$$

что находится в хорошем согласии с данными, полученными по моделирующей программе. Из этих же предположений следует, что величина $\Delta_\eta(Z)$ должна быть равна величине скачка сечения передачи энергии ВЭ $\Delta_{en}(Z)$. Получена аппроксимация $\Delta_{en}(Z) = 390 \cdot Z^{-1.27}$ и подтверждено это следствие. Отмечается, что зависимости средней энергии и среднего угла вылета ВЭ от энергии квантов не содержат скачка.

Исследованы зависимости выходов ВЭИ из бинарных смесей материалов Al, Cu, Ag, Au, облучаемых квантами с энергией E_γ от 0.05 до 1.25 МэВ. Показано, что выход из смеси может быть рассчитан как средний выход из компонент смеси.

Следующий пункт (п.2.2) посвящен описанию выхода и средней энергии ВЭ при различных углах падения квантов на плоскую мишень.

Используя метод трансляций, были рассчитаны выходы и средние энергии ВЭ для шестнадцати углов ориентации θ и десяти толщин h мишеней из алюминия, меди, серебра, золота, облучаемых квантами с энергией $E_\gamma = 0.02, 0.05, 0.1, 0.662, 1.25, 2$ МэВ. Анализ набора данных позволил сделать следующие выводы:

- зависимость выхода от угла θ может быть описана линейной функцией $\cos(\theta)$ в интервалах $(-1,0)$ и $(0,+1)$;

- зависимость выхода от угла может быть представлена в виде $\eta(Z, E_\gamma, \theta) = \eta^F F_\eta (\eta^B / \eta^F, \theta)$.

На основе этих выводов построена феноменологическая модель, позволившая описать набор данных с относительной погрешностью не хуже 10%. Модель справедлива, когда поток квантов не изменяется при прохождении мишени. Для получения более общих соотношений использовано предположение об экспоненциальном законе ослабления потока квантов без изменения их спектра. В этом предположении получено:

$$\eta(\theta) = \eta^F \begin{cases} \exp(-\mu_{tot} h / \cos\theta) (a + (1-a) \cos\theta), & \cos\theta > 0 \\ \frac{(1 - \exp(-q / |\cos\theta|)) \cos\theta}{q} (a + (a - \eta^B / \eta^F) \cos\theta), & \cos\theta < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$a = (\eta^B / \eta^F)^{0.35}, \quad q = a \cdot \eta^F$$

Экспоненциальные множители в (2) могут заметно отличаться от единицы лишь для скользких углов падения квантов $\cos\theta \leq 10^{-3}, 10^{-2}$. Это отличие, однако, существенно при расчете выхода из плоской мишени, облучаемой изотропным источником, так как пренебрежение ослаблением квантов приводит к логарифмической расходимости результатов расчета. Использование (2) позволило получить результаты, которые находятся в хорошем согласии с имеющимися в литературе данными.

В пункте 2.3 описана обобщенная феноменологическая модель для расчета выхода и выноса энергии ВЭ из ограниченных тел. Пред-

полагается, что тело выпуклое, а характерные размеры и радиусы кривизны поверхности значительно превосходят средний пробег ВЭ. Получены выражения для интегральных выходов ВЭ при облучении мононаправленным (η_1^*) и изотропным (η_2^*) потоками квантов

$$\eta_1^* = \eta^F(aS + (1-a)S_{\perp} + (\eta^B/\eta^F - a)S_{\perp}) \quad (3)$$

$$\eta_2^* = 4\bar{S}_{\perp}K_{\eta}, \quad K_{\eta} = \frac{\eta^F + \eta^B + 2a\eta^F}{4} \quad (4)$$

где S_{\perp} , \bar{S}_{\perp} - площадь проекции мишени на плоскость, перпендикулярную направлению распространения квантов и средняя площадь проекции. Рассмотрено обобщение выражения (4) для тел произвольной формы. Показано, что (4) справедливо и в этом случае. Исследованы зависимости интегральных характеристик ВЭ от размера тела. Показано, что для описания этих зависимостей можно использовать выражения, полученные для пластин, в которых толщина h заменяется эффективным размером $x = 4V/S$ (V, S - объем и площадь поверхности) ограниченного тела.

Третья глава посвящена решению задач дозиметрии ВЭИ в гетерогенных системах. В пункте 3.1 приведены результаты исследования процессов формирования распределений поглощенной энергии и объемного заряда в многослойных мишенях. Для описания распределения поглощенной энергии $D^{\circ}(x)$ в рамках двухстадийного процесса (кванты - вторичные электроны - атомы вещества) использовалось выражение

$$D_i^{\circ}(x) = \sum_{j=1}^M \Delta E_{1j} \exp(-x/\delta_{1j}) / \delta_{1j} + D_{10}^{\circ} \quad (5)$$

где x - расстояние до границы раздела сред; D_{10}° - величина равновесного распределения. Разделение на M групп проводилось по виду процессов взаимодействия квантов с атомами. Изменения энергии ΔE_{1j} в среде i за счет переноса электронов группы j выражаются через средние энергии, выносимые из мишеней в вакуум, и эффективные коэффициенты отражения ВЭ в контактирующих средах. Пространственные параметры модели δ_{1j} могут быть интерпретированы как средние проекции пробега ВЭ на направление движения кванта. Расчет величин ΔE_{1j} и δ_{1j} проводился на основании данных о выходах и средних энергиях ВЭ, полученных в предыдущей главе.

Для описания трехстадийного процесса (кванты - флуоресцент-

ные кванты - вторичные электроны - атомы вещества) формирования поглощенной энергии $D^Y(x)$ было получено выражение, которое достаточно хорошо аппроксимируется экспоненциальными функциями. Поэтому, сравнение распределений, формируемых двух- и трехстадийным процессами проведено по пространственным параметрам и интегральным энергиям переноса. Результаты позволяют сделать следующие выводы:

- на расстояниях, характерных для переноса ВЭ, изменение величины $D^Y(x)$ мало;
- при совпадении пространственных параметров вклад энергии переданной флуоресцентными квантами в приграничные распределения мал и при любом сочетании граничащих материалов не превышает 1% ;
- наиболее сильно сказывается перенос флуоресцентных квантов при таком сочетании, когда энергия флуоресцентного кванта одного из материалов близка (но больше) энергии ионизации L-оболочки атома вещества второго материала.

Показано, что в гетерогенных материалах, содержащих вещества с большим атомным номером ($Z \geq 30$), облучаемых квантами низких энергий (до сотен кэВ), перенос энергии флуоресцентными квантами существен.

В следующем пункте (п. 3.2) описаны распределения поглощенной энергии вблизи границы плоской мишени при различных углах падения квантов. Данные для анализа рассчитаны методом трансляций и обрабатывались с использованием экспоненциальной аппроксимации приграничных эффектов:

$$D(\theta, x) - D_0 = \frac{\Delta E(\theta)}{\delta_0(\pi - \theta)} \exp\left[-\frac{x}{\delta_0(\pi - \theta)}\right] \quad (6)$$

Величина среднего пробега в направлении нормали к поверхности мишени $\delta_0(\theta)$ вычислялась по значению выходов $\eta(\theta)$. Полученная аппроксимация на расстояниях от границы больших $0.3 \delta_0(\theta)$ обеспечивает расчет с погрешностью не хуже 10%. Проведен анализ данных о значении дозы непосредственно на границе мишени. Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало их удовлетворительное согласие. Сформулировано предложение о постановке эксперимента по определению зависимости дозы на границе мишени от угла падения квантов.

Обобщенное описание приграничных распределений дозы и заряда

на случай границы раздела произвольной формы приведено в п. 3.3. Обобщение базируется на представлении величины поглощенной дозы в виде суперпозиции вкладов от потоков ВЭ, излучаемых малыми площадками границы раздела

$$D(\vec{x}) = \int_S F(\vec{x}', \theta', \theta) dS. \quad (7)$$

Делаются упрощающие предположения:

- функция влияния факторизуема по всем переменным

$$F(\vec{x}', \theta', \theta) \equiv f(\vec{x}') \cdot \eta(\theta) \Psi(\theta');$$

- функция $f(\vec{x}')$ зависит лишь от расстояния между точкой источника и наблюдения $f(\vec{x}') \equiv f(r)$, $r = |\vec{x}'|$;

- функция $\eta(\theta)$ - выход ВЭ с плоской поверхности;

- функция $\Psi(\theta')$ - угловое распределение ВЭ.

Используя предположения, определена связь функции $f(r)$ с распределением поглощенной энергии $D_{пл}(x)$ вблизи плоской границы раздела и получена функция влияния в виде

$$F(\vec{x}', \theta', \theta) = \frac{\eta(\theta)}{2\pi n^2} r^{n-1} \frac{d}{dr} \left[\frac{D_{пл}(r)}{r^n} \right] |\cos^n \theta'|. \quad (8)$$

Сделанные упрощающие предположения справедливы для квантов низких энергий ($E_\gamma \leq 0.1$ МэВ). Поэтому, выражения (7), (8) позволили исследовать зависимости распределений поглощенной энергии от кривизны поверхности для потоков рентгеновских квантов. Расчеты проводились для поверхностей эллипсоидов вращения. Результаты показывают, что с уменьшением радиуса кривизны поверхности уменьшается характерная пространственная ширина распределения. При этом значение дозы непосредственно на границе раздела не изменяется. Анализ этих результатов показывает, что они достаточно общие и могут быть использованы при исследовании воздействия рентгеновского излучения на композиты.

Более детальные исследования дозиметрии ВЭИ в микронеоднородных средах представлено в разделе 3.4. Изучались гетерогенные системы, представимые в виде однородной матрицы со стохастическим расположением включений. Исследования проводились в рамках микродозиметрии подхода, т.е. по следующей схеме:

- определялась ячейка реализации пространственного расположения фаз в соответствии с длиной пробега вторичных частиц;

- среда представлялась в виде периодической структуры ячеек;

- выбирались параметры ячейки, изменение которых наиболее

сильно влияет на исследуемые характеристики;

-решалась задача определения зависимости дозиметрических величин от параметров ячейки;

-рассчитывались распределения дозиметрических величин по данным о флуктуациях параметров ячейки.

Для реализации этого подхода был проведен анализ функции, описывающей поток энергии ВЭ при его распространении в гетерогенной среде. Показано, что в силу широкого углового и энергетического распределений ВЭ функция хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Пространственным параметром аппроксимации может быть выбран экстраполированный пробег электрона со средней энергией для рассматриваемого типа источника ВЭ. Используя эту аппроксимацию, получены выражения для средней дозы, поглощенной в матрице \bar{D}_1^m и во включении \bar{D}_1^B композиционного материала, при облучении его рентгеновскими квантами. Примеры расчетов проведены для композита, образованного полиэтиленовой матрицей, содержащей медные включения. Показано, что величины флуктуаций невелики ($\leq 10\%$), и для композиционных материалов такого типа можно применять периодическую модель среды.

В четвертой главе рассмотрены электрические токи и поля, возникающие в гетерогенных системах при облучении их фотонами. Электрический ток, протекающий в гетерогенной системе, связан с переносом быстрых ВЭ и, как следствие, зарядением отдельных фаз системы. Для решения задач электродинамики существенным может быть направление распространения ВЭ. Поэтому проведено обобщение феноменологической модели на случай описания вектора плотности тока. Получены выражения, корректно описывающие вектор плотности тока быстрых ВЭ для относительно небольших углов падения квантов. Проведено сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными и установлено, что для углов падения $\theta < 60^\circ$ наблюдается удовлетворительное согласие данных.

Для получения величины тока быстрых ВЭ в многослойных структурах использовались значения выходов ВЭ (токи из пластины в вакуум), и учитывались отражения электронов от контактирующих слоев. Рассмотрено несколько примеров структур и получены простые аналитические выражения для расчета величин электрических токов.

Анализ токов быстрых ВЭ в многослойной мишени показывает, что зависимость тока от угла падения квантов может быть представлена в виде $I(\theta) = A + B \cos\theta$, где константы A и B определяются характеристиками лишь граничных слоев. При соответствующем подборе материалов конструкции мишени можно добиться выполнения условия $|A| < |B|$ для некоторой области энергий квантов. В этом случае существует угол компенсации θ_c , который соответствует такой ориентации мишени, при которой полный ток в системе равен нулю. Наличие угла компенсации позволяет использовать многослойные конструкции для определения направления на источник излучения.

Электрические токи в гетерогенной системе определяются потоками ВЭ из фаз системы, а следовательно, в области низких энергий фотонов, в основном, фото и Оже электронами. Этот факт является особенностью гетерогенной системы, так как в однородной среде величины токов определяются, в основном, потоками ВЭ, образованными при комптоновском рассеянии квантов.

В пункте 4.2 рассмотрены электрические поля, образовавшиеся за счет возникновения в облучаемом материале распределений объемного заряда. Наличие диэлектриков в фазах гетерогенной системы приводит к медленной релаксации разделенных зарядов, что является причиной возникновения квазистационарных электрических полей.

В случае облучения фотонами процессы формирования объемного заряда определяются разделением зарядов в среде на существенных пространственных неоднородностях. Неоднородность существенна, когда ее характерный размер сравним со средним пробегом ВЭ. Отмечается, что при наличии в среде существенных неоднородностей определяющими являются потоки ВЭ на границах этих неоднородностей, а образованием объемного заряда за счет изменений потока квантов в среде, как правило, можно пренебречь. Значительное разделение зарядов имеет место при большой разнице в сечениях образования вторичных заряженных частиц в фазах гетерогенной системы, что может наблюдаться для фаз даже с небольшим отличием в атомных номерах при облучении рентгеновскими квантами.

Проведено изучение распределений объемного заряда в плоских многослойных мишенях, облучаемых гамма - квантами. Получены выражения, описывающие распределение инжектированного заряда вблизи границы раздела слоев и проведено их сравнение с имеющимися экс-

периментальными данными. На примере расчета реакции зарядового детектора проведена апробация модельных описаний распределений дозы и заряда вблизи плоской границы раздела сред. Полученные расчетные значения удовлетворительно согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Закономерности, выявленные при анализе работы зарядового детектора, указывают пути экспериментальных исследований характеристик потоков ВЭИ в плоских многослойных структурах.

В пункте 4.3 рассмотрены радиационная электризация и электропроводность гетерогенных систем типа диэлектрический материал с мелкодисперсными включениями. Исследован случай, когда определяющая роль в формировании токов принадлежит потокам быстрых ВЭ из включений. Это реализуется, например, для композитов, у которых матрица имеет достаточно малый атомный номер ($Z \leq 14$), а включения большой ($Z \geq 22$), и облучение проводится рентгеновскими квантами. Для этого случая получено выражение, описывающее максимальную напряженность электрического поля в матрице вблизи поверхности включения

$$E_{\max} = \frac{eK_n J \gamma^{1-\Delta}}{K_\gamma (\mu_{\text{en}} E_\gamma / 2)^\Delta} \quad (9)$$

где K_γ , Δ - электрические коэффициенты материала, μ_{en} - полный массовый коэффициент поглощения энергии. Отмечается, что эмпирические коэффициенты Δ , как правило, близки к единице. Поэтому зависимость от интенсивности потока квантов слабая. Численные оценки показывают, что для гетерогенных систем, в которых матрица хороший диэлектрик, электрические поля могут быть сравнимы с полями двойного электрического слоя, присутствующего на границе раздела фаз, и, следовательно, могут влиять на физико-химические процессы в системе.

Проведен анализ влияния электризации гетерогенных систем на распространение в них ВЭ. Сделан вывод, что возникающие электрические поля не существуют при рассмотрении переноса ВЭИ.

Рассмотрена радиационная проводимость диэлектрических материалов с мелкодисперсными включениями. Изучение проводилось в предположении, что величина радиационной проводимости пропорциональна мощности поглощенной энергии при однородном энерговыделе-

нии в диэлектрической матрице. Это предположение позволило использовать результаты п. 3.4. Численные исследования показывают, что вынос ВЭ из включений существенно изменяет зависимость радиационной проводимости от энергии фотонов. Поэтому имеется возможность использовать эти зависимости для целей дозиметрии ВЭИ.

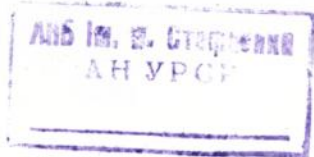
Пятая глава диссертации посвящена исследованиям в области радиационно - акустической дозиметрии излучений в гетерогенных системах. Рассматриваются критерии возможности макроскопического описания и обобщаются основные уравнения радиационной акустики. Используется модель эквивалентной гомогенной среды и приближение линейной акустики для описания радиационно- акустических эффектов. Модель описывает величину продольного компонента акустического смещения - амплитуду акустического импульса. Характерная частота возбуждаемого акустического импульса предполагается много меньше частоты собственных колебаний включений. Поэтому расчет амплитуды $U(\vec{x}, t)$ может быть выполнен без детального знания динамики колебаний отдельных включений введением осредненного по объему квазистатического давления $P(\vec{x}, t)$ в гетерогенной системе.

За счет различий поглощающих (тормозных) способностей веществ фаз гетерогенной системы действие излучения приводит к термодинамически неравновесному состоянию зоны облучения. Межфазный перенос энергии изменяет темп и вид радиационного разогрева отдельных компонент среды. При этом может наблюдаться запаздывание нагрева по сравнению с действием излучения. Наличие такого запаздывания является причиной специфичного для гетерогенных систем эффекта.

Вводится модельное описание давления $P(\vec{x}, t)$, возникающего при передаче энергии $Q(\vec{x}, t)$ ионизирующего излучения гетерогенной системе

$$P(\vec{x}, t) = \int_0^t G(\beta, t-t') Q(\vec{x}, t') dt' \quad (10)$$

где функция $G(\beta, t)$ - удельное давление при мгновенном введении энергии, равномерно распределенной в эквивалентной среде, ϵ - характеризует долю энергии, переданную включениям. Величина ϵ определяется соотношениями п. 3.4. Функция $G(\beta, t)$ является обобщением для гетерогенной системы параметра Грюнрайзена.



Выражение (10) позволило получить соотношение связывающее амплитуду $\vec{U}(\vec{x}, t)$ в гетерогенной среде с амплитудой акустического импульса $\vec{U}_0(\vec{x}, t)$, возбуждаемого излучением в гомогенной среде

$$\vec{U}(\vec{x}, t) = \vec{U}_0(\vec{x}, t) + \frac{G_\infty - G(\beta)}{G(\beta)} \int_0^t f(\beta, t-t') \vec{U}_0(\vec{x}, t') dt' \quad (11)$$

где $G(\beta)$, G_∞ - удельные давления, развивавшиеся в системе в начальный момент времени $G(\beta) = G(\beta, 0)$ и при установлении теплового равновесия $G_\infty = G(\beta, \infty)$. Функция нестационарности среды $f(\beta, t) = \frac{\partial G(\beta, t)}{\partial t} / (G_\infty - G(\beta))$ описывает динамику межфазного переноса энергии.

Анализ наиболее общих закономерностей акустического импульса, возбуждаемого в гетерогенной среде, проводился, исходя из соотношения (11), на классе функций $U_0(\vec{x}, t)$, реализуемых как амплитуды акустических импульсов, возбуждаемых в гомогенной среде.

Изучению параметров модели, необходимых для проведения расчетов, посвящен п. 5.2. Эффективный параметр генерации гетерогенной системы представляется в обобщенном виде:

$$G(\beta) = \sum_{i=1}^N \frac{q_i \Gamma_i}{L_i} \quad (12)$$

где q_i , Γ_i и L_i - доля переданной энергии, параметр Грнрайзена и коэффициенты эффективности генерации i -й фазы системы. Такое представление содержит лишь безразмерные величины и в нем выделены радиационные q_i , теплофизические Γ_i и физико - механические L_i характеристики фаз. Коэффициенты L_i определяют реакцию композиционного материала на расширение фазы. Получены выражения для величин L_i при сферической, цилиндрической и чешуйчатой форме включений. Анализ показал, что величины L_i при определенных отношениях модулей упругости включений и среды могут быть как много больше, так и много меньше единицы. Поэтому, эффективный параметр генерации $G(\beta)$ может существенно превышать или быть много меньше любого из параметров Грнрайзена веществ, входящих в композицию (эффект композиции). Проведены численные оценки и показано, что в случае, когда излучение поглощается лишь включениями и модули включения много больше, чем модули упругости матрицы, величина $G(\beta)$ много меньше параметров Грнрайзена как матрицы, так и включения при любой форме включений. Когда модули упругости включений много мень-

ше модулей среды и включения имеют чешуйчатую форму, эффективный коэффициент генерации $G(\beta)$ существенно превышает параметры генерации веществ, входящих в композицию. Для гетерогенных систем с аномально малыми коэффициентами генерации даже небольшой перенос энергии между включением и матрицей за счет вторичного излучения и теплопередачи приводит к сильной зависимости величины $G(\beta, t)$ от времени. Это значит, что нестационарность гетерогенной системы играет существенную роль в формировании радиационно - акустического импульса. В работе проведен анализ функции нестационарности $f(\beta, t)$ гетерогенной системы. Получена ее аналитическая аппроксимация для достаточно широкого класса композитов. Показано, что для композитов, образованных непрерывной фазой (матрица), содержащей включения лишь из одного вещества, наличие переноса энергии вторичными частицами определяет зависимость функции нестационарности среды от вида и спектра ионизирующего излучения.

В следующем пункте (5.3) обсуждаются возможности использования акустического отклика гетерогенной системы для целей дозиметрии импульсных потоков излучения. Анализируется роль переноса ВЭИ в балансе энергии, переданной фазам композита. Показано, что величина отношения плотности поглощенной энергии в матрице к плотности поглощенной энергии во включении не менее 10^{-3} , что и определяет нижнюю границу коэффициентов генерации среды.

На основе построенной модели проведен анализ данных радиационно - акустических экспериментов. В эксперименте использовали специально созданные мишени из композитов, образованных парафиновой матрицей с вольфрамовыми включениями двух типов - с характерным размером $d = 100 + 150$ мкм и $d < 50$ мкм, но с одинаковой объемной концентрацией включений. Облучение проводилось на пучке электронного ускорителя и на импульсной установке рентгеновского излучения. Экспериментально были обнаружены эффекты композиции (параметр генерации этих композитов меньше параметров Грюнрайзена вольфрама и парафина) и нестационарности (отличие параметров генерации почти в три раза для композитов с различным размером включений). Результаты анализа экспериментальных данных подтверждают основные выводы теоретического рассмотрения.

В Заключении представлены основные результаты, полученные в диссертации.

1. Создан метод моделирования вторичного излучения использующий внутреннюю симметрию ограниченных пространственных областей и позволяющий проводить локальные оценки потоков заряженных частиц. Разработаны алгоритмы реализации и проведено тестирование метода на примере расчета характеристик вторичного электронного излучения. Показано, что рассчитанные этим методом наборы данных позволяют корректно получить физические закономерности.

2. Разработаны модификации метода для локальных оценок характеристик взаимодействия излучения с веществом в гетерогенных системах. Проведено тестирование модификаций метода на примере расчета распределений поглощенной энергии. Показано, что расчеты могут быть выполнены с высоким пространственным разрешением, и их результаты корректно описывают основные физические закономерности приграничных эффектов.

3. Анализ разработанных методов показал, что получаемые наборы данных имеют конечную относительную статистическую погрешность и сильную положительную корреляцию, позволяющую проводить теоретико-числовые исследования (численный эксперимент). Реализация методов обеспечивает высокое быстродействие создаваемых вычислительных схем для традиционных задач и представляет новые возможности для исследований. Получены соотношения для оценки эффективности использования этих методов при решении различных задач о прохождении и взаимодействии излучения с веществом.

4. Исследованы процессы формирования потоков вторичных электронов из мишени, облучаемой квантами с энергией близкой к энергии ионизации К-оболочки атомов. Показано, что определяющую роль играют фотоэффект с L-оболочки и рождение электронов Оже. Получены соотношения для расчета величины скачка выходов и выноса энергии вторичными электронами на К-крае поглощения квантов.

5. Создана феноменологическая модель и получены формулы, описывающие зависимость потока и средней энергии вторичных электронов, выходящих из плоской мишени, от угла падения квантов и толщины мишени. Показано, что имеющиеся наборы данных удовлетворительно описываются этой моделью (с относительной погрешностью не хуже 15%).

6. Получены формулы для расчета потока и энергии вторичного электронного излучения из ограниченных тел. Показано, что при

изотропном облучении величина потока пропорциональна средней площади проекции мишени, а коэффициент пропорциональности не зависит от формы мишени. Получены соотношения, связывающие потоки из ограниченных тел с потоками из плоских мишеней, облучаемых нормально падающим пучком гамма-квантов.

7. Проведен анализ вклада элементарных процессов взаимодействия гамма-квантов низких энергий с атомами вещества в формирование приграничных распределений поглощенной энергии и объемного заряда. Показано, что процессы образования и переноса флуоресцентных квантов могут быть определяющими. Получены критерии необходимости учета этих процессов.

8. На основе феноменологической модели описания характеристик вторичного электронного излучения получена универсальная аппроксимация распределений поглощенной энергии в плоской мишени при любых углах падения гамма-квантов. Показано, что рассчитанные локальные значения доз на границе мишени, хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными по регистрации выходов истинно-вторичных электронов.

9. Развито теоретическое описание распределений поглощенной энергии и объемного заряда вблизи границы раздела достаточно общего вида. Получены соотношения, связывающие распределения вблизи плоской границы с распределениями вблизи границы общего вида. Показано, что максимум в распределениях слабо зависит от радиуса кривизны поверхности, а пространственные параметры распределений уменьшаются (увеличиваются) с уменьшением (увеличением) радиуса кривизны.

10. Разработан микродозиметрический подход для расчета характеристик взаимодействия излучения со стохастическими микронеродными средами. Получены формулы для расчета средней поглощенной энергии в фазах такой среды при облучении ее рентгеновскими квантами. Анализ флуктуаций средней поглощенной энергии показал, что квазипериодическая модель среды может быть использована при проведении расчетов дозиметрических характеристик.

11. Показано, что при прохождении квантов через гетерогенные мишени основной вклад в индуцируемый электрический ток может давать процесс фотоэффекта, в отличие от случая однородных мишеней, когда привалирующим является Комpton эффект. Проведен анализ за-

зависимости тока в плоской многослойной мишени от угла падения гамма-квантов и предсказано существование угла компенсации, при котором полный ток в некоторой части мишени равен нулю.

12. Изучены электрические явления, возникающие при прохождении гамма-квантов в диэлектрических материалах, содержащих микро неоднородные включения. Показано, что электрические явления определяются переносом вторичного электронного излучения, приграничными распределениями поглощенной энергии и объемного заряда. Получены зависимости величин токов, электрических полей и проводимости таких материалов от характеристик вторичных электронов, позволяющие использовать электрические явления для целей дозиметрии и спектрометрии гамма-излучения.

13. Развита теоретическая модель, связывающая энерговыделение в фазах микро неоднородной среды с ее акустическим откликом. Разработаны рекомендации по созданию композиционных материалов с заданными радиационно-акустическими характеристиками.

14. Проведен анализ экспериментальных работ по дозиметрии ионизирующих излучений в гетерогенных системах, выполненных с помощью регистрации ее акустического отклика. Определены возможности использования радиационно-акустического эффекта для целей дозиметрии и спектрометрии ионизирующих излучений в микро неоднородных средах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. Ахиезер И. А., Лазурик В. Т. Динамический эффект при прохождении пучков заряженных частиц в твердых телах. //ЖЭТФ. -1972. -Том 63. -Вып. 5(11). -С.1776-1779.
2. Лазурик В. Т. Динамический эффект пучка γ -квантов в твердом теле. //ФТТ. -1973. -Том 15. -№2. -С. 654-655.
3. Воловик В. Д., Лазурик В. Т. Акустический эффект пучков заряженных частиц в металлах //ФТТ. -1973. -Том 15. -№8. -С. 2305-2307.
4. Воловик В. Д., Калиниченко В. И., Лазурик В. Т. Устройство для определения характеристик пучка гамма-квантов //Авт. свид. на изобр. N458285 от 26.09.1974.
5. Адауров А. Ф., Лазурик В. Т. Распределение поглощенной энергии в слоистой мишени при гамма-облучении. //Атомная энергия. -1977

- Том 43. -Вып. 1. -С. 57-59.
6. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Шилобреев В. А., Яковлев М. В. Распределение объемного заряда в слоистых конструкциях //Атомная энергия. -1981. -Том 50. -Вып. 5. -С. 344-346.
 7. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т. Расчет выхода быстрых вторичных электронов под действием рентгеновского излучения //Атомная энергия. -1981. -Том 50. -Вып. 3. -С. 211-212.
 8. Калининченко А. И., Лазурик В. Т. Термоакустический эффект пучков излучений в гетерогенных средах. //ЖТФ. -1981. -Том 51. -N11 -С. 2449-2450.
 9. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т. Расчет неравновесных распределений поглощенной дозы и объемного заряда при гамма-облучении // Атомная энергия. -1982. -Том 52. -Вып. 3. -С. 197-198.
 10. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Шилобреев В. А., Яковлев М. В. Расчет зарядового детектора гамма-излучения //Проблемы ядерной физики и космических лучей. -1982. -Вып. 17. -С. 60-69.
 11. Adadurov A. F., Lazurik V. T. Secondary electrons and distribution of the absorbed energy in a one-dimentional bayer structure under gamma irradiation. //UCRL-TRANC. -11465. -1982. -Feb. -P. 81-85.
 12. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т. Электронная компонента в защитах от гамма-излучения //Сб. докл. III Всес. науч. конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. -Тбилиси: ТГУ. -1983. -Том 3. -С. 8-15.
 13. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т. Локальные оценки в задачах с распределенными источниками //Препр. ИФВЭ. -83-07. -Алма-Ата. -1983.
 14. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т. Локальные характеристики вторичной электронной компоненты //Проблемы ядерной физики и космических лучей. -1983. -Вып. 19. -С. 70-79.
 15. Grudskii M. Ya., Roldugin N. N., ..., Lazurik V. T. Experimental investigation and Monte Carlo calculation of photon-induced electron emission from solids. //Nucl. Instr. Meth. -1984. -V. 227. -N1-P. 126-134.
 16. Давыдов А. А., Калининченко А. И., Лазурик В. Т. О радиационно-акустических эффектах в средах с эллипсоидальными включениями. // Проблемы ядерной физики и космических лучей. -1984. -Вып. 21. -С. 43-49.

17. Давыдов А. А., Калининченко А. И., Лазурик В. Т. Возможности использования радиационно-акустического метода для определения толщин покрытий. //Измерительная техника. -1984. -№10-С. 15-16.
18. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Модификация метода локальных оценок для расчета дифференциальных характеристик вторичных электронов. //Вопросы атомной науки и техники. -Сер. Общая и ядерная физика. -1985. -Вып. 3(32). -С. 44-46.
19. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Пространственно-угловые характеристики вторичных электронов при гамма-облучении //Атомная энергия. -1985. -Том 58. -Вып. 6. -С. 454-455.
20. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Пространственно-энергетическое распределение быстрых вторичных электронов при гамма-облучении //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. -1985. -Вып. 3(32). -С. 47-51.
21. Давыдов А. А., Лазурик В. Т. Возбуждение звука в гетерогенном материале импульсом проникающего излучения. //Акуст. журн. -1985. -Том 31. -Вып. 5. -С. 705-706.
22. Зальцовский И. И., Калининченко А. И., Лазурик В. Т. Введение в радиационную акустику //Харьков: Вища школа, изд. ХГУ. -1986. -168с.
23. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Радиационный заряд, возникающий в гетерогенной среде под действием рентгеновского излучения //Тез. докл. IV Всес. совещ. "Воздействие ионизирующих излучений и света на гетерогенные системы"-Кемерово: КГУ. -1986. -С. 44-45.
24. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Зависимость распределения поглощенной энергии от угла падения квантов //Проблемы ядерной физики и космических лучей. -1986. -Вып. 25. -С. 77-81.
25. Давыдов А. А., Корчиков С. Д., Лазурик В. Т. Акустический эффект ионизирующих излучений в гетерогенных средах. //ЖТФ. -1987. -Том 57. -Вып. 9. -С. 1850-1851.
26. Лазурик В. Т. Флуктуации локальных оценок, проведенных методом трансляций //Микродозиметрия и ее применение в радиобиологии. -Москва: МЗО-1988. -С. 111-114.
27. Ададулов А. Ф., Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Расчет неравновесных распределений поглощенной энергии фотонов //Микродозиметрия и ее применение в радиобиологии. -Москва: МЗО. -1988. -С. 14-19.
28. Лазурик В. Т. Расчет пространственных распределений переданной энергии методом трансляций //Микродозиметрия и ее применение

- в радиобиологии. - Москва: МЭО. - 1988. - С. 115-119.
29. Ададуров А. Ф., Лазурик В. Т., Шилобреев Б. А., Яковлев М. В. Распределение объемного заряда вблизи границы раздела сложной геометрической формы при гамма-облучении // Вопросы атомной науки и техники. - Сер. Общая и ядерная физика. - 1988. - Вып. 3(43). - С. 21-22.
 30. Ададуров А. Ф., Лазурик В. Т., Шилобреев Б. А., Яковлев М. В. Исследование приграничных эффектов при гамма-облучении // Вопросы атомной науки и техники. - Сер. Общая и ядерная физика. - 1988. - Вып. 3(43). - С. 3-7.
 31. Лазурик В. Т. Приграничные эффекты в гетерогенных средах, облучаемых квантами низких энергий // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. - 1988. - Вып. 3(43). - С. 16-18.
 32. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Электрические поля, возникающие в диэлектрической матрице композита при облучении рентгеновскими квантами // Сб. Электрофизика неоднородных диэлектриков. - Томск: ТПИ. - 1988. - С. 42-43.
 33. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Методы расчета вторичного излучения в гетерогенных средах // Тез. докл. V Всес. науч. конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. - Протвино: ИФВЭ. - 1989. - С. 49.
 34. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Вторичное электронное излучение при гамма-облучении композиционных материалов // Тез. докл. V Всес. науч. конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. - Протвино: ИФВЭ. - 1989. - С. 129.
 35. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В., Тютнев А. П. Перенос вторичных электронов и радиационная проводимость в микронеоднородных материалах // Проблемы ядерной физики и космических лучей. - 1989 - Вып. 31. - С. 21-27.
 36. Лазурик В. Т. Микродозиметрический подход при описании радиационных эффектов в гетерогенных системах // Материалы VI Всес. совещ. по микродозиметрии. - Москва: МИФИ. - 1989. - С. 107-108.
 37. Лазурик В. Т., Рогов Ю. В. Распределение поглощенной энергии в материалах с мелкодисперсным наполнителем // Материалы VI Всес. совещ. по микродозиметрии. - Москва: МИФИ. - 1989. - С. 109-110.
 38. Барсуков В. Л., Войлов Ю. Г.,, Лазурик В. Т., Гамма-телескоп // Авт. свид. на изобр. N1690477 от 08.07.91.

469000

AB 26.346

AB 26.346