

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ СИЛЬНОТОЧНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ПО ГЛУБИНЕ СЛОЯ ВОДЫ

А.И. Пушкарев, Р.В. Сазонов

НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета

E-mail: aipush@mail.ru

Выполнены измерения распределения по глубине слоя воды поглощенной дозы и энергии сильноточного импульсного электронного пучка, формируемого ускорителем ТЭУ-500 (350...500 кВ, 60 нс, плотность тока 0,3...0,4 кА/см²). Использована высококоразрешающая методика измерения распределения дозы и энергии с применением дозиметрической пленки на основе лавсана с феназиновым покрытием. Пространственное разрешение при регистрации поглощенной дозы в диапазоне 5...100 мкГр составляет 20...30 мкм. Показано, что при поглощении электронного пучка с высокой плотностью тока (в условиях перекрытия треков на поверхности поглощающего слоя) распределение поглощенной дозы по глубине в пределах $\pm 10\%$ совпадает с распределением, полученным для слабotoчного пучка.

Введение

Распределение энергии электронов по глубине при поглощении в конденсированных средах хорошо изучено и аппроксимировано различными эмпирическими соотношениями [1, 2]. Характерное для вещества в конденсированной фазе распределение поглощенной дозы обусловлено многократным рассеянием первичных и образованием вторичных электронов. По мере замедления электронов в среде ионизационные потери возрастают и вместе с тем растет число вторичных, а также число обратно рассеянных из более глубоких слоев электронов, повышается плотность ионизации атомов среды, а следовательно, и поглощенная в веществе энергия. С другой стороны, многократное рассеяние первичных электронов приводит к значительному разбросу их пробегов в веществе и тем самым уменьшает не только число электронов, двигающихся в первоначальном направлении, но и число обратно рассеянных электронов. Наличие этих двух процессов приводит к образованию широкого суперпозиционного максимума в распределении поглощенной энергии по глубине вещества. Вследствие процессов рассеяния максимум распределения (в отличие от кривых Брэгга для тяжелых частиц) расположен не в конце максимального пробега, а значительно смещен к поверхностным слоям вещества [2].

Этот механизм описывает поглощение электронных пучков с низкой плотностью тока (одноэлектронное приближение). При взаимодействии излучения с жидкостью основная часть вторичных электронов, образующихся в результате ионизации среды, имеет благодаря своей низкой энергии малый пробег и поэтому производит ионизацию и возбуждение в непосредственной близости от места своего образования. Импульсный радиолиз жидкофазных соединений в условиях воздействия электронного пучка с высокой плотностью тока (более 100 А/см²), когда уже на поверхности облучаемой жидкости треки перекрываются, представляет большой интерес. При этом формируются условия, благоприятные для многократных столкновений частиц с избыточным запасом энергии на внутренних степенях свободы. В этих усло-

виях возможно отклонение распределения поглощенной дозы от известных зависимостей. Данные условия проведения радиолиза жидких соединений не изучены и представляют научный и практический интерес для исследования механизма диссипации электронного пучка.

В работе [3] поглощение энергии электронов оценивалось способом фильтров по показаниям двух детекторов, расположенных за фильтрами различной толщины, и расчетом по эмпирическим формулам. В работах [4, 5] для измерений поглощенной дозы использовали пленочные пластиковые детекторы ЦДП-2-Ф2 [6]. Выполнено измерение поля поглощенной дозы электронов (0,5...1 МэВ) в воде по глубине способом фильтров в геометрии узкого пучка. При измерении поглощенной энергии электронов в слое жидкости способом фильтров сложно обеспечить однородную толщину поглощающего слоя и возможность варьирования толщины с шагом менее 0,1 мм, что приводит к низкой точности измерения.

Цель представленной работы – исследование распределения электронного пучка с высокой плотностью тока по глубине слоя воды и разработка высококоразрешающего метода измерения распределения энергии электронов при поглощении в жидкости.

1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на импульсном электронном ускорителе ТЭУ-500 (350...500 кВ, 60 нс, плотность тока 0,3...0,4 кА/см²) [7]. Для измерения напряжения использовали емкостной делитель, расположенный в маслonaполненной камере. Полный ток электронного пучка измеряли цилиндром Фарадея. На рис. 1 приведены осциллограммы ускоряющего напряжения на катоде планарного диода при облучении воды и полного тока электронного пучка.

Для измерения поглощенной дозы при облучении непрерывными и импульсными электронными пучками широко используется дозиметрическая радиационно-чувствительная пленка (сополимер с

феназиновым красителем) типа ПОР [6]. Толщина пленки составляет 0,1 мм (толщина чувствительного слоя 15 мкм), что позволяет регистрировать величину поглощенной дозы с высоким пространственным разрешением. При энергии электронов более 200 кэВ потери в дозиметрической пленке незначительны. Для измерения распределения поглощенной дозы импульсного электронного пучка по глубине слоя жидкости (воды) был изготовлен специальный реактор, рис. 2. В металлическом корпусе реактора – 1 выполнено коническое углубление под углом 9° . На эту поверхность укладывается диск из дозиметрической пленки – 2. Нижняя часть корпуса реактора закрывается тонкой алюминиевой фольгой – 4. В конструкции реактора имеется устройство для натяжения алюминиевой фольги.

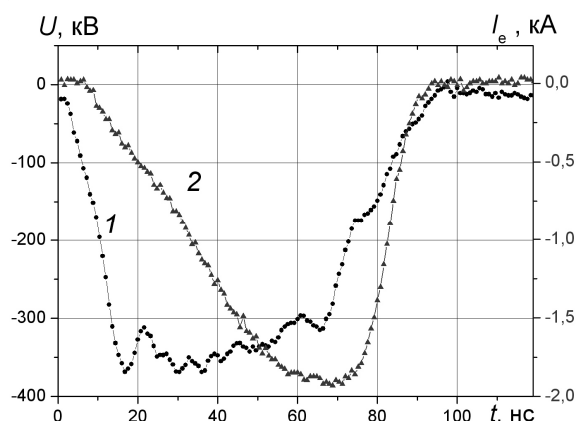


Рис. 1. Осциллограммы: 1) напряжения, приложенного к планарному диоду, 2) тока электронного пучка

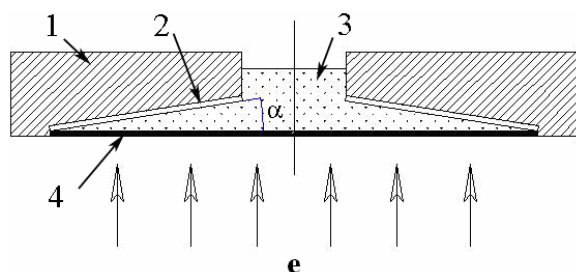


Рис. 2. Схема измерения поглощенной дозы импульсного электронного пучка в жидкости: 1) корпус камеры, 2) дозиметрическая пленка, 3) жидкость, 4) алюминиевая фольга толщиной 10 мкм

В объем между фольгой и дозиметрической пленкой заливается исследуемая жидкость – 3. Ниже алюминиевой фольги устанавливалась узкая полоска дозиметрической пленки. По оптической плотности этой полоски определяли распределение плотности энергии электронного пучка на входе в реактор.

2. Расчет распределения поглощенной дозы электронного пучка в воде

Измерение распределения по глубине жидкости поглощенной дозы электронов, имеющих энергию менее 500 кэВ, представляет техническую сложность, так как глубина их полного поглощения не

превышает 1,5 мм. При измерении методом фильтров необходимо обеспечить равномерную толщину слоя жидкости и изменять его с шагом менее 0,1 мм. Поэтому имеющиеся в литературе экспериментальные данные распределения в воде поглощенной дозы электронов с энергией ниже 1 МэВ значительно расходятся, рис. 3.

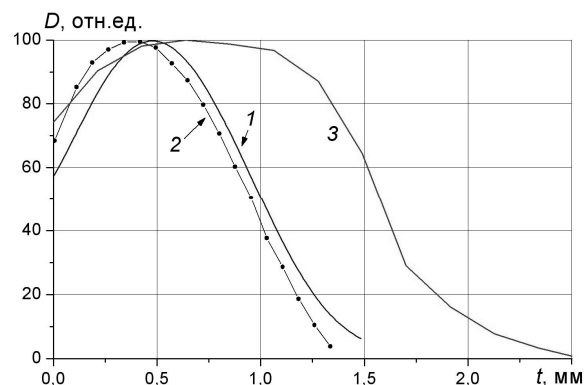


Рис. 3. Распределение поглощенной дозы электронов с энергией 0,5 МэВ в воде. Данные: 1) расчетные, 2) работы [2], 3) работы [8]

Распределение поглощенной дозы электронов в алюминии промерено с высокой точностью. Для определения глубины поглощения электронов в веществе пересчитывают их распределение в алюминии по известным значениям экстраполированного пробега для исследуемого вещества [1, 2]. Экспериментальные данные распределения поглощенной дозы моноэнергетичного электронного пучка (с разной энергией) в алюминии хорошо совпадают при нормировании соответствующих значений глубины t на экстраполированный пробег электронов R с этой энергией.

На рис. 4 показано распределение по нормированной глубине алюминия $d=t/R$ поглощенной дозы моноэнергетичного пучка электронов с разной энергией. Величину R рассчитывали по формуле Фламмерсфильда [1].

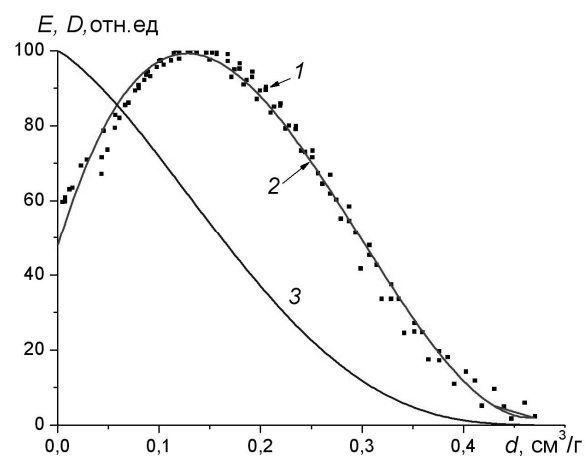


Рис. 4. Распределение моноэнергетичного электронного пучка в алюминии: 1) экспериментальные данные, 2) аппроксимирующая зависимость поглощенной дозы, 3) плотность энергии электронного пучка

Экспериментальные значения поглощенной дозы, представленные на рис. 4, были аппроксимированы полиномом 3 степени (кривая 2 рис. 4), который в дальнейшем использовался для расчета распределения поглощенной дозы импульсного электронного пучка при разном ускоряющем напряжении. Расчет пробега электронов в исследуемой жидкости выполняли по соотношению [1]:

$$t = d R \frac{(Z/A)_{Al} \rho_{Al}}{(Z/A)_x \rho_x}, \quad (1)$$

где Z – заряд в единицах заряда позитрона, A – атомная масса (в а.е.м.) мишени (алюминия или исследуемого вещества), ρ_{Al} – плотность алюминия, ρ_x – плотность исследуемого вещества.

Распределение плотности энергии электронного пучка по глубине слоя поглощающего вещества равно:

$$E(t) = E_0 - \rho \int_0^t D dt, \quad (2)$$

где E_0 – плотность энергии на поверхности (Дж/см²), ρ – плотность вещества.

Полученная нормированная зависимость распределения плотности энергии по глубине алюминия показана на рис. 4 (кривая 3).

На рис. 3 для сравнения показаны распределения поглощенной дозы в воде для моноэнергетичного пучка электронов с энергией 0,5 МэВ, приведенные в работах [2, 8], и зависимость, рассчитанная по изложенной выше методике. Видно, что распределение поглощенной дозы в воде, полученное на основе пробега в алюминии, хорошо совпадает с экспериментальными данными, приведенными в работе [2]. С зависимостью 1 рис. 3 в дальнейшем мы сравнивали наши экспериментальные данные.

3. Измерение распределения плотности энергии электронного пучка в воде

Дозиметрическая пленка ПОР представляет собой тонкий слой радиационно-чувствительного покрытия, нанесенного на лавсановую подложку. При измерении поглощения электронного пучка в воде возможны 2 варианта расположения дозиметрической пленки – фенозиновым покрытием к воде или к корпусу реактора.

В первой серии экспериментов дозиметрическую пленку располагали фенозиновым покрытием к корпусу реактора. Электроны пучка проходили слой воды, лавсановую пленку и затем попадали в фенозиновое покрытие дозиметрической пленки, вызывая изменение его окраски. В соответствии с методикой [9], по изменению оптической плотности дозиметрической пленки определяли изменение плотности энергии в поперечном сечении импульсного электронного пучка на входе реактора и при прохождении слоя воды. Экспериментальные данные, рис. 5, соответствуют трем разным секторам диска из дозиметрической пленки, облученно-

го за один импульс. Значение $r=0$ соответствуют внешнему краю диска дозиметрической пленки.

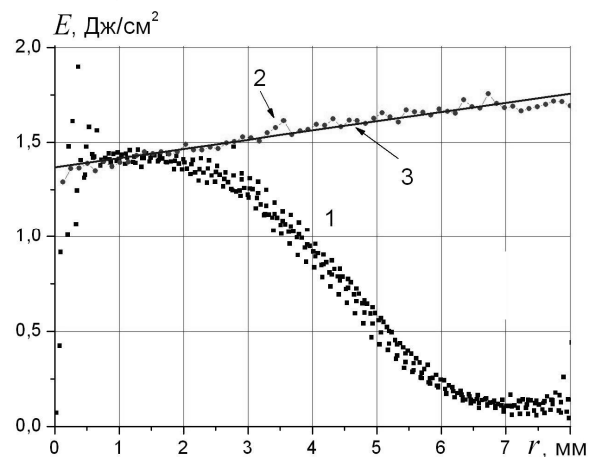


Рис. 5. Изменение плотности энергии по сечению импульсного электронного пучка: 1) после прохождения слоя воды, 2) на входе реактора

При измерении поглощения в слое воды необходимо учитывать изменение плотности энергии электронного пучка в поперечном сечении на входе реактора (кривая 2 на рис. 5). Оно хорошо описывается линейной зависимостью 3 (рис. 5) $E(d) = E_0 \cdot (1 + 0,04 \cdot d)$. На рис. 6 приведена скорректированная зависимость плотности энергии электронного пучка с учетом его неоднородности по сечению (кривая 1). Переход от распределения плотности энергии пучка в поперечном сечении $E(r)$ к распределению плотности энергии $E(t)$ после прохождения слоя воды толщиной t выполнен по формуле $t = d \cdot \text{tg}(9^\circ)$.

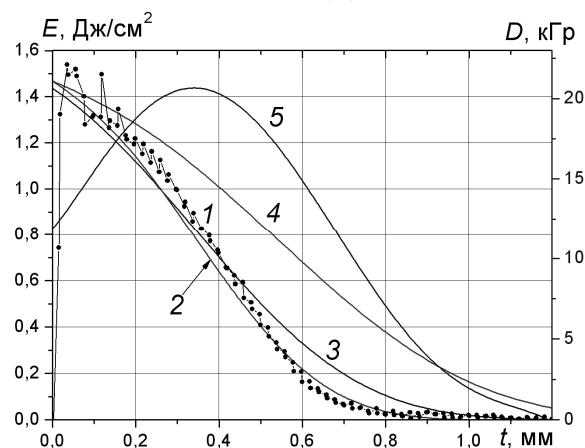


Рис. 6. Распределение плотности энергии импульсного электронного пучка по глубине воды: 1) экспериментальные данные, 2–4) расчет для электронов с энергией 300, 350, 400 кэВ, 5) расчет поглощенной дозы электронного пучка

Распределение $E(t)$ моноэнергетичного пучка по глубине слоя воды рассчитывали по соотношению (2), при этом пробег электронов в воде определяли по соотношению (1). Полученные зависимости показаны на рис. 6 (кривые 2–4). На рис. 6 показана также расчетная зависимость распределения поглощенной дозы электронов с энергией

350 кэВ. Зависимости (3) и (5) взаимосвязаны. Интеграл распределения поглощенной дозы моноэнергетического электронного пучка по глубине (размерность Дж·см/кг), умноженный на плотность воды, равен плотности энергии на поверхности слоя воды (1,4 Дж/см²).

Видно, что экспериментальные точки соответствуют распределению по глубине воды электронов с энергией от 300 до 350 кэВ, что совпадает со средним ускоряющим напряжением на диоде (см. рис. 1).

4. Измерение распределения поглощенной дозы электронного пучка в воде

В следующей серии экспериментов диск из дозиметрической пленки располагали фенозапиновым покрытием к воде. На рис. 7 показаны расчетные зависимости распределения энергии и поглощенной дозы электронов с энергией 350 кэВ, а также экспериментальные данные. Интеграл распределения поглощенной дозы по глубине, умноженный на плотность воды, равен плотности энергии электронного пучка на поверхности слоя воды. Видно, что экспериментальные точки больше соответствуют распределению поглощенной дозы электронов по глубине слоя воды, а не распределению энергии.

В случае расположения радиационно-чувствительного фенозапинового покрытия к воде, в которой поглощается электронный пучок, изменение оптической прозрачности покрытия вызывают не только электроны пучка, но и вторичные электроны. Сечение взаимодействия электронов с низкой энергией с материалом фенозапинового покрытия значительно выше, чем для электронов с высокой энергией. Поэтому мы регистрируем в основном концентрацию вторичных электронов, которая пропорциональна плотности энерговыделения в воде (поглощенной дозе). Если дозиметрическая пленка расположена лавсановой подложкой к воде, то в радиационно-чувствительное покрытие попадают только первичные электроны пучка, и мы регистрируем убыль энергии пучка по мере увеличения толщины поглощающего слоя воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1006 с.
2. Чепель Л.В. Применение ускорителей электронов в радиационной химии. – М.: Атомиздат, 1975. – 152 с.
3. Федоров В.М. Измерение энергии электронов сильноточных мегавольтовых пучков по жесткости рентгеновского излучения из толстой мишени. – Новосибирск: Наука, 1986. – 128 с.
4. Kotov Yu.A., Sokovnin S.Yu. X-ray diagnostics of high-current E-beam // Proc. of 8th IEEE Pulsed Power Conf. – San Diego, California, 1991. – P. 629–632.
5. Соковнин С.Ю. Рентгеновская диагностика параметров сильноточного электронного пучка // Приборы и техника эксперимента. – 1992. – № 4. – С. 125–130.
6. Генералова В.В., Гурский М.Н. Дозиметрия в радиационной технологии. – М.: Издательство стандартов, 1981. – 184 с.

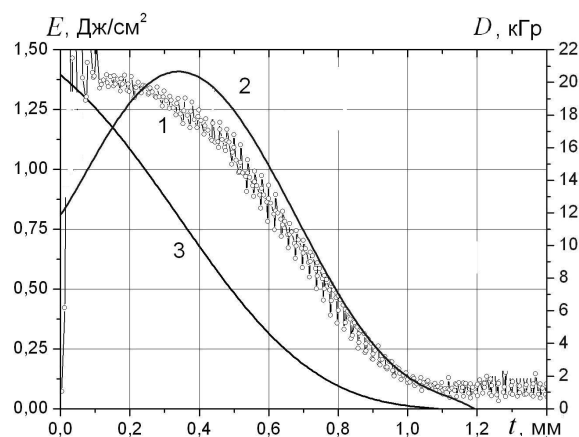


Рис. 7. Распределение импульсного электронного пучка с энергией 350 кэВ при поглощении в воде: 1) экспериментальные данные (для спектра), 2) для поглощенной дозы D , 3) для плотности энергии E

Заключение

При поглощении электронного пучка с высокой плотностью тока (в условиях перекрытия треков на поверхности поглощающего слоя) распределение поглощенной дозы по глубине удовлетворительно совпадает с распределением, полученным для слаботочного пучка. Для измерения использована модернизированная методика, регистрирующая распределение за один импульс. Разработанная методика позволяет независимо измерять распределение энергии и поглощенной дозы электронного пучка в слое поглощающей жидкости. Пространственное разрешение не ниже 30 мкм, что обеспечивает высокую точность регистрации распределения в слое жидкости поглощенной дозы электронов с энергией менее 500 кэВ. Погрешность измерения средней энергии электронов пучка не превышает 20 %, поэтому разработанную методику можно использовать как экспресс-метод калибровки датчиков ускоряющего напряжения на катоде электронного диода.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 06-08-00147.

7. Ремнев Г.Е., Фурман Э.Г., Пушкарев А.И., Карпузов С.Б., Кондратьев Н.А., Гончаров Д.В. Импульсный сильноточный ускоритель с согласующим трансформатором // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 130–134.
8. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы. – М.: Наука, 1985. – 375 с.
9. Гончаров Д.В., Ежов В.В., Пушкарев А.И., Ремнев Г.Е. Исследование распределения плотности энергии сильноточного импульсного электронного пучка // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 6. – С. 76–80.

Поступила 28.11.2006 г.