

рических систем и систем управления энергоблоков АЭС могут быть реализованы в ПК-SimInTech. Примером такой реализации являются математические модели 2-го контура и электрических систем энергоблока БРЕСТ-ОД-300.

Интегральную математическую модель энергоблока БРЕСТ-ОД-300 можно использовать для проверки проектных решений и расчетного модуля программной части тренажера на этапе эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Obraztsov E.P., Belikov A.N., Menshikov N.N., Popkov E.N.** Electrical calculation code RELECS in CSS «VEB» for NPP designs. — In: Intern. Congress on Advances in Nuclear Power Plants ICAPP, 2016, p. 1131—1140.
2. **Магид С.И., Архипова Е.Н., Куличихин В.В.** Актуальные вопросы развития тренажеростроения современной электроэнергетики. — Надежность и безопасность энергетики, 2015, № 4, с. 20—34.
3. **Поляков А.М., Субботин П.В.** Комплекс виртуальных лабораторных работ по дисциплине «эксплуатация электрооборудования электростанций и подстанций». Тезисы докл. 21-й Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 2015, т. 3 с. 172.
4. **Сыромятников И.А.** Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. Под ред. Л.Г. Мамиконянца. М.: Энергоатомиздат, 1984. 240 с.
5. **Фельдман М.Л., Черновец А.К.** Особенности электрической части атомных электростанций. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1983. 172 с.
6. **Виноградов А.Б.** Векторное управление электроприводами переменного тока. ГОУВПО «ИГЭУ», Иваново, 2008. 298 с.
7. **Кавун О.Ю., Куно М.Я., Фейман В.Г.** Программа TRP для теплогидравлического расчета сложных теплогидравлических сетей. — В сб.: Нейтроника-97. Обнинск, 1998, с. 111—118.

Поступило в Редакцию 22.03.18

УДК 539.1

УГЛОВОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭНЕРГИЕЙ 8,5 МэВ

*Рывкин Б.Н. (ООО «РусАтомЭкспертиза», г. Москва), Скачков Е.В.
e-mail: evg-skachkov@yandex.ru*

Для эффективного использования тормозного излучения ускорителей электронов важно знать его пространственно-энергетическое распределение (угловое распределение). Теория удовлетворительно совпадает с экспериментом только при толщине мишени 0,01 радиационной длины, на практике применяют мишени толщиной от 1 до 5 и больше [1]. Поэтому основные результаты получены экспериментально или математическим моделированием. Предложены полуэмпирические выражения путем введения разных поправок в теоретический спектр Шиффа [2]. Угловое распределение тормозного излучения зависит от энергии электронов, их энергетического и углового распределения, размера пучка электронов, материала и толщины мишени, материала и толщины выходного окна ускорителя, конструкции мишенного узла.

Измерение углового распределения является сложной технической задачей: ускорители, как правило, импульсные, длительность импульса составляет не более десятков микросекунд, интенсивность излучения высокая. Прямое измерение под разным углом требует быстродействующих спектрометров. Поэтому

в большинстве исследований измеряют мощность дозы тормозного излучения или активируют вещества с известным сечением активации (активационные детекторы), т.е. в действительности измеряют не угловое распределение, а некоторую функцию от него. В первом случае — это мощность дозы, во втором — выход реакции — интеграл (или сумма по активационным уровням) произведения углового распределения при данном угле на сечение активации. Для восстановления углового распределения необходимо знать зависимость мощности дозы моноэнергетических γ -квантов или зависимость сечения активации и иметь набор активационных детекторов с разной зависимостью сечения от энергии [3, 4]. Эти сведения или неизвестны, или известны с большой погрешностью. Для практического применения тормозного излучения важно знание пространственного распределения мощности дозы (облучение продукции, онкологических больных) или пространственного распределения выхода активации (активационный анализ).

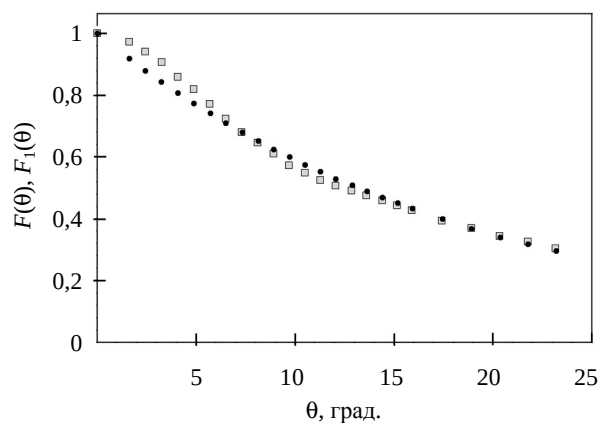
Целью настоящего исследования является получение исходного углового распределения тормозного

излучения электронов для оптимизации, т.е. снижения погрешности определения содержания золота в геологических пробах на установках типа «Аура» [5]. Исследовали зависимость выхода активации кадмиевых фольг тормозным излучением электронов ускорителя ЛУЭ-8-5. Тормозная мишень наборная, состоит из фольг вольфраморениевого сплава суммарной толщиной 700 мкм — 0,2 радиационной длины, оптимальная для активационного анализа. Размер пучка электронов 3 мм определяли по изображению на фотопластинке. Мишень охлаждали проточной водой суммарной толщиной 3 мм. Выходным окном ускорителя служила танталовая фольга толщиной 50 мкм. Энергию электронов 8,5 МэВ определяли магнитным спектрометром, разброс электронов в пучке по энергии 5% (ширина на полувысоте распределения). Ток электронов 100 мкА контролировали микроамперметром. На расстоянии 70 мм от мишени размещали пластину толщиной 1 мм из кадмия размером 63×54 мм. Платину разбивали на квадраты, которые нумеровали, центральную часть пластины размером 51×42 мм разбивали на квадраты со стороной 3 мм, остальную — на квадраты со стороной 6 мм. Время облучения 20 мин, окончание облучения фиксировали. В результате активации ядра изотопа ^{111}Cd возбуждался изомерный уровень, который распадался с периодом полураспада 49,1 мин испусканием γ -квантов энергией 396 кэВ. Под действием тормозного излучения образовывался изомер ^{113m}Cd , период его полураспада 13,6 года, энергия γ -квантов 264 кэВ. Из-за большого периода полураспада и малого времени облучения вклад этого изомера в измеряемую наведенную активность был почти нулевой. После облучения пластину разрезали на квадраты в соответствии с разметкой, каждый квадрат взвешивали. Затем регистрировали наведенную активность с фиксацией начала измерения. Наведенную активность измеряли на гамма-спектрометре фирмы ORTEC (США) сцинтилляционным детектором NaI(Tl) размером 150×100 мм, энергетическим разрешением 8,2%. Время измерения 100—300 с.

В набранном энергетическом спектре определяли площадь пика полного фотоэлектрического поглощения N_i (i — номер квадрата) с максимальной статистической погрешностью не более 5%. Затем рассчитывали площадь фотопика на окончание облучения M_i по выражению

$$M_i = N_i \exp(-0,693t_{b_i}/T)/m_i [1 - \exp(-0,693t_{n_i}/T)],$$

где t_{b_i} , t_{n_i} , T — время выдержки (время от окончания облучения до начала измерения активности), измерения активности и период полураспада ^{111m}Cd соответственно; m_i — масса квадрата.



Измеренное $F(\theta)$ (□) и рассчитанное угловое распределение $F_1(\theta)$ (●)

Определили квадрат с максимальной площадью фотопика M_m как положение оси пучка тормозного излучения на пластине, расстояние r_i от центра квадрата с M_m до центра i -го квадрата, угол падения тормозного излучения на i -й квадрат

$$\theta_i = \arctg(r_i/a),$$

где a — расстояние пластина—мишень, и относительное угловое распределение

$$F(\theta_i) = M_i(r_i^2 + a^2)/M_m a^2 \cos \theta_i.$$

Результаты показаны на рисунке. Для $F(\theta_i)$ методом наименьших квадратов получили аналитическое выражение

$$F_1(\theta) = \exp(-0,694\theta/\theta_1),$$

где $\theta_1 = 13,12^\circ$ — полуширина углового распределения на полувысоте. Расхождение между расчетом и экспериментом составило не более 5%.

Полуширина экспериментального распределения на полувысоте равна 12° , что значительно больше теоретической $1,2^\circ$ для бесконечно узкого пучка электронов при мишени толщиной 0,01 радиационной длины. Если учесть размер пучка электронов 3 мм, принятый в настоящей работе, полуширина возрастет до 7° . Видно, что увеличение толщины мишени до 0,2 радиационной длины повышает полуширину углового распределения тормозного излучения почти в 2 раза.

Экспериментальное угловое распределение узкое, конечной целью исследования является снижение предела определения комплекса «Аура». Поэтому измерена активность фольг из кадмия, размещенных в разных точках контейнера. Высота контейнера 40, диаметр 100 мм. Внутри контейнера имеются две перегородки диаметром 33 и 66 мм. Фольги из кадмия толщиной 1 мм квадратной формы со стороной 6 мм размещали на этих трех диаметрах на расстоянии 3, 20 и 37 мм (центры квадратов) от нижнего ос-

нования. Внутренний объем контейнера заполняли маршалитом, и тормозным излучением электронов ускорителя ЛУЭ-8-5 облучали его боковую поверхность. Ось пучка перпендикулярна оси контейнера и проходит через среднюю плоскость, расстояние мишень—ось контейнера 98 мм. Диаметр пучка электронов 3 мм, вольфрамовая тормозная мишень толщиной 4 мм (почти 10 радиационных длин). Контейнер при облучении вращался вокруг своей оси с частотой 1200 об./мин. Время облучения 19 мин, энергия электронов 8 МэВ, ток 56 мкА.

Измеренная активация кадмиевых фольг на расстоянии от основания контейнера 3, 20, 37 мм при диаметре 33 мм составляла 15 470, 23 350, 15 110, 66 мм — 10 860, 17 940, 11 900, 100 мм — 10 600, 14 630, 9200 соответственно. Видна большая неоднородность активации по контейнеру как для плоскости, параллельной основанию (в 1,5 раза), так и между плоскостями (в 1,6 раза). Отношение максимальной активации к минимальной составляет почти 2,5. Активация вещества в центре контейнера наибольшая (в центре фольги не размещали), следовательно, неоднородность активации еще больше. Это приведет к низкой воспроизводимости результатов анализа из-за случайного смещения вещества пробы во время облучения при его неравномерном распределении, что характерно для золотосодержащих рудных проб. При облучении контейнер вращается с большой скоростью, при транспортировке для измерения активности происходит удар, что смещает вещество, и повторный анализ приводит к другому результату. И действительно, в распакованном после анализа контейнере в центральной его части вещества меньше, но масса

общего вещества не изменилась. Это негативно влияет на воспроизводимость результатов при низкой концентрации золота, т.е. в области предела определения, а также в случае крупных золотин. Неоднородность активации можно уменьшить увеличением диаметра пучка электронов, изменением формы контейнера или прецессией оси контейнера при вращении во время облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев В.П. Вторичное излучение ускорителей электронов. М.: Атомиздат, 1979. 200 с.
2. Петрунин В.И., Огородников С.А., Арлычев М.А., Шевелев И.Е. Математическая модель рассеяния фотонов в веществе в задачах расчета и оптимизации радиационной защиты для инспекционно-досмотровых комплексов. — ВМУ. Сер. 3. Физика, астрономия, 2015, № 2, с. 42—47.
3. Peri E., Orion I. Shielding calculation for industrial 5/7,5 MeV electron accelerators using the MCNP Monte Carlo code. — In: EPJ Web of Conf., 2017, v. 153, 03011, p. 1—6.
4. Ранюк Ю.Н., Шевченко О.С., Гостищев В.Н. и др. Мониторингирование низкоэнергетичных пучков тормозного излучения с помощью реакции $^{115}\text{In}(\gamma, \gamma^J)^{115m}\text{In}$. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационного материаловедения, 2004, № 3, с. 108—111.
5. Балашов П.В., Бурмистенко Ю.Н., Иванов И.Н. и др. Промышленная установка «Аура» для определения золота и сопутствующих элементов в рудных пробах. — Там же. Сер. Радиационная техника, 1979, вып. 18, с. 132—136.

Поступило в Редакцию 10.01.19

Р е ф е р а т ы

Продолжение. Начало см. на с. 345

UDC 624.04.45.001.3

Medvedev V.N., Skorikova M.I. (IBRAE RAN, Moscow). **Influence of the Rheological Characteristics of Concrete on the Stress-Strain State of Containment of Nuclear Power Plant.** — Atomic Energy, 2019, v. 126, № 6, p. 317—320.

The paper provides a comparative analysis of the effect of concrete rheological characteristics on the stress-strain state of containments of nuclear power plants. It is based on tests of concrete for shrinkage and creep, field observations, calculations of deformations and stresses in reinforcement and con-

crete from concrete shrinkage and creep. The results of the analysis showed a difference in the obtained data. Therefore, when assessing the stress-strain state of containments of nuclear power plants under the influence of operational and emergency loads, it is recommended to use field data and detailed design models in which the cross section parameter and the pitch of rod reinforcement correspond to the design values. Fig. 4, tab. 2, ref. 7.

УДК 621.039.522, 546.161; 546.798.2

Лизин А.А., Томилини С.В., Осипенко А.Г., Незговоров Н.Ю., Игнатьев В.В., Кормилицын М.В. **Исследование растворимости PuF_3 и AmF_3**