

вием применимости будет требование, чтобы прямопролетные нейтроны не успевали в процессе замедления выйти за пределы области, а это равносильно неравенству $R/l_{s0} \geq 2k\xi/(1-\xi)$. Из рис. 1, а видно, что при $k = 5$ процесс замедления завершается при $\xi \approx 0,35 \div 0,4$, т. е. необходимо $R/l_{s0} \approx 6$. Средний квадрат удаления нейтронов от источника составит при этом $\langle r_*^2 \rangle \approx 0,3 \cdot 8 \times \langle v_0^2 \rangle \tau_0^2 \approx 2,4 l_{s0}^2$, но условие $R/l_{s0} \geq 1,6$ было бы слишком мягким.

Проведенное рассмотрение, опирающееся на уравнения (4) — (6), имеет тот существенный недостаток, что в нем не учитывается скорость направленного движения среды к центру мишени. Увлечение нейтронов к центру носит сложный характер, поскольку важную роль играет разогрев нейтронного газа [2], особенно в среде тяжелых ядер. Разогрев нейтронного газа усиливает его миграцию. В мишени малого размера остаются те нейтроны, которые испытали больше столкновений, но они же накапливают энергию при столкновениях в центрально-симметричном потоке тяжелых ядер, т. е. наблюдается явление, обратное диффузионному охлаждению. В работе [3]

отмечено, что при скорости направленного движения ядер $\sim 5 \cdot 10^6$ м/с разогрев нейтронного газа совместно с повышением средней энергии за счет нейтронов деления может скомпенсировать потери энергии нейтронов в неупругих столкновениях на ^{238}U . Поясним это положение результатом численного расчета для центрально-симметричного однородного движения тяжелых ядер. На рис. 2, а показано число нейтронов n_m в максимуме импульса (в бесконечной среде ^{238}U) в зависимости от $\gamma = u_0/v_1$, где v_1 — скорость нейтрона, имеющего энергию 1 МэВ. Исходное число нейтронов принято за единицу, их начальные энергии распределены по спектру деления. На рис. 2, б показана зависимость времени возрастания числа нейтронов в e раз от γ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков В. М., Шихов С. Б. Препринты ИАЭ-2340. М., 1973; ИАЭ-2384, М., 1974.
2. Кострица А. А. «Изв. АН. КазССР. Сер. физ.-мат.», 1977, № 4, с. 67.
3. Кострица А. А. «Изв. АН. КазССР. Сер. физ.-мат.», 1979, № 2, с. 90.

Поступила в Редакцию 04.06.79

УДК 621.039.76(068)

Уровни облучения различных профессиональных групп и оптимизация радиационного контроля

ИВАНОВ В. И., КОРЕНКОВ И. П., САЛИМОВ О. Н.

Одна из характерных черт нашего времени — широкое использование атомной энергии в мирных целях. Применение методов, основанных на использовании ионизирующих излучений, не только способствует дальнейшему техническому прогрессу, но и дает огромный экономический эффект, составляющий в нашей стране более 250 млн. руб. в год [1].

Если раньше вопросами применения ионизирующих излучений в мирных целях занималось ограниченное число учреждений, то в настоящее время трудно назвать какую-либо сферу народного хозяйства, где бы они не использовались. Достаточно отметить, что только за последние годы отечественной промышленностью выпущено более 10 тыс. гамма-дефектоскопов, 60 тыс. радиоизотопных приборов, сооружено свыше 50 мощных гамма-установок с источниками излучения до 50 Ки (1 Ки = $3,700 \cdot 10^{10}$ Бк) [2].

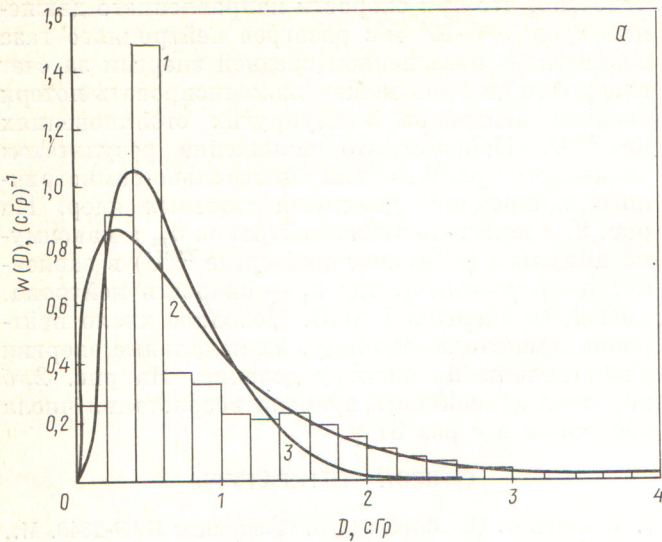
Особенно широко используются радиоизотопы в медицинской практике. Уже в 1965 г. в нашей стране функционировало 17,5 тыс. рентгеновских кабинетов, оборудованных 35 тыс. аппаратов и 21 тыс. флюорографов, а число радиологических отделений достигло 200. К началу 1977 г. число

рентгеновских кабинетов превысило 30 тыс., рентгеновских аппаратов — 48 тыс., радиологических отделений более 600 [3].

Значительно возросло применение радиоизотопов в странах — членах СЭВ. Например, потребление радиоизотопов в ЧССР за последние 10 лет увеличилось в 6—7 раз, а число медицинских учреждений, в которых используются радиоактивные препараты, в 2,5 раза. Годовой прирост потребности в радиоактивных медицинских препаратах составляет 20—30% [4].

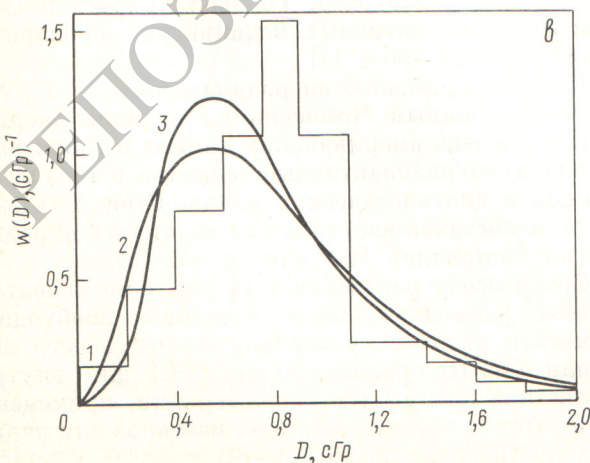
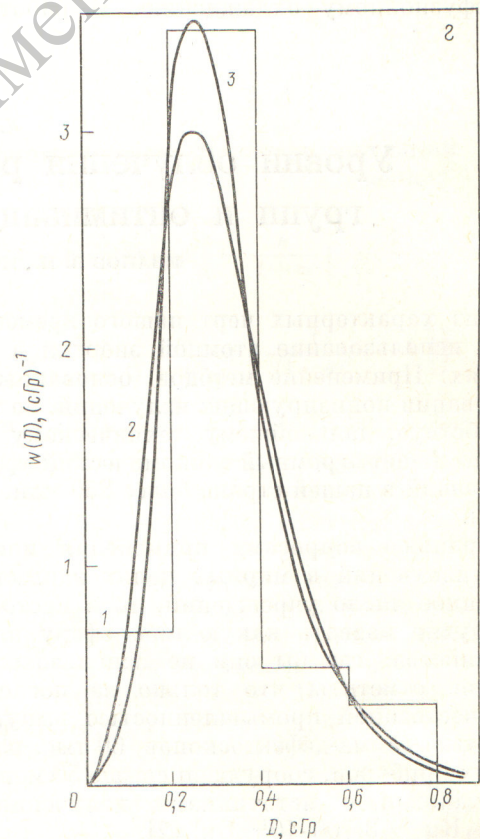
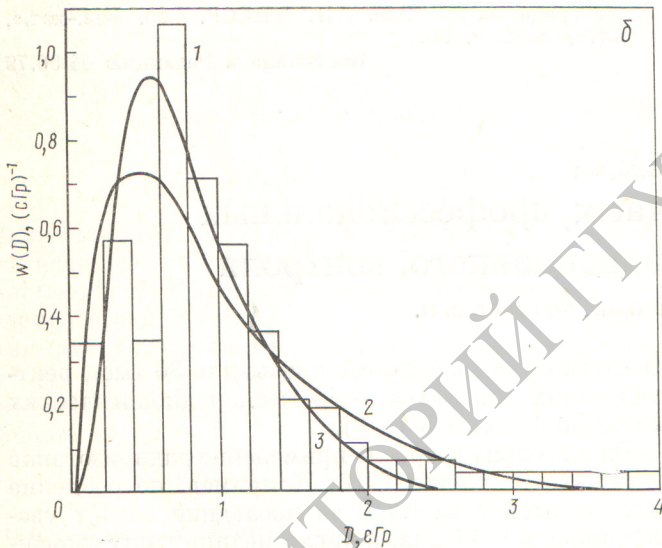
Широко применяются радиоизотопы и за рубежом. По данным Комиссии по атомной энергии США, в 5 тыс. американских клиник и госпиталей используют радиоактивные вещества в терапевтических и диагностических целях. Стоимость ежегодных поставок изотопов для медицинской радиологии составляет 700 млн. долл. [5].

Среди особо перспективных работ по использованию радиоизотопов в медицине необходимо отметить разработку методов последующего введения (МПВ), использование ^{252}Cf для внутриполостной и внутритканевой терапии, применение генераторов короткоживущих изотопов для радиодиагностических целей [6—8].



В связи с тем что применение ионизирующих излучений в народном хозяйстве, науке и медицине связано с радиационной опасностью, контроль за уровнями облучения персонала при возрастающих масштабах использования атомной энергии в мирных целях является особо актуальным. Кроме того, данные таких наблюдений имеют большое практическое значение для оценки эффективности защитных мероприятий и относительности радиационной опасности различных технологических процессов.

Нами на протяжении 15 лет проводится исследование методом фотодозиметрии для определения индивидуальных доз облучения персонала, работающего с ионизирующими излучениями в различных отраслях народного хозяйства. Применяются кассеты ИФК-2, 3 М и ИФКУ, размещаемые в области грудной клетки, со временем экспозиции дозиметров 30 сут. Градуировка фотопленок проводилась во ВНИИМ. Обработку рабочих и контрольных пленок проводили по общепринятой методике.



Аппроксимация плотности распределения годовых доз для медицинского персонала, проводящего рентгенодиагностику (а), внутрисполостную терапию (б), радиоизотопную диагностику (в) и дистанционную терапию (г): 1 — реальное распределение; 2 — γ -распределение; 3 — логарифмически-нормальное распределение; 1 сантигрей (сГр) = = 0,01 грея (Гр)

Как видно из представленных на рисунке данных, уровень облучения различных профессиональных групп составляет от 0,2 до 4,0 рад/год (1 рад = 0,01 Гр). Наибольшему облучению подвергаются сотрудники медицинских учреждений, проводящие внутривенную терапию, рентгенодиагностические исследования и радиоизотопную диагностику с помощью генераторов короткоживущих изотопов.

В системе массового индивидуального контроля важное место занимают вопросы обоснования объема выборки для различных профессиональных групп. Известно, что при оценке отдаленных эффектов облучения персонала используют соответственно концепции средней или коллективной дозы:

$$\langle D \rangle = \int_0^{\infty} D w(D) dD;$$

$$S = \int_0^{\infty} DN(D) dD,$$

где N — общее число лиц, подвергшихся облучению; $w(D)$ — плотность распределения доз, связанных соотношением $N(D) = w(D) N$.

Однако для различных значений плотности распределения доз (при одинаковых значениях средних доз и одной и той же зависимости доза — эффект) среднее число отдаленных радиобиологических эффектов может быть различным. Более полно любой вид плотности распределения доз можно описать с помощью совокупности моментов плотности распределения [9]:

$$m_n = \int_0^{\infty} D^n w(D) dD \quad (d = 1, 2, \dots).$$

Для унификации данных о структуре популяционных доз можно использовать аппроксимацию плотности распределения доз теми или иными аналитическими зависимостями. В работе [10] для этого использовано логарифмически-нормальное распределение, в работах [11, 12] применено γ -распределение:

$$\gamma(D) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} D^{\alpha-1} e^{-\beta D},$$

где α, β — параметры плотности распределения доз; $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1} e^{-y} dy$ — γ -функция; y — переменная интегрирования.

Начальные моменты плотности дозного распределения в этом случае вычисляются по соотношению

$$m_n = \Gamma(\alpha + n) / \Gamma(\alpha) \beta^{-n} \quad (n = 1, 2, \dots). \quad (1)$$

Параметры α и β находят через начальные моменты m_1 и m_2 :

$$\beta = m_1 / (m_2 - m_1^2); \quad \alpha = m_2 \beta.$$

Положение максимума D_0 γ -распределения можно определить, приравнявая нулю первую производную:

$$[\gamma(D) \Gamma(\alpha)]' = D^{\alpha-1} e^{-\beta D} \left(\frac{\alpha-1}{D} - \beta \right) = 0.$$

Отсюда

$$D_0 = (\alpha - 1) / \beta. \quad (2)$$

Результаты аппроксимации плотности распределения доз для медицинского персонала, проводящего различные процедуры, представлены на рисунке. Выбрать ту или иную аналитическую зависимость для аппроксимации можно, например, сравнением значений третьего отбрасываемого момента плотности распределения доз, полученного аналитически и из реального распределения.

Знание плотности распределения доз позволяет определить необходимый объем выборки при массовом дозиметрическом контроле, а также найти путь его оптимального проведения. При некоторых предположениях можно получить, что относительная погрешность δ_1 определения первого момента (средней дозы) выражается соотношением [11]

$$\delta_1 = \delta + b_1 N^{-1/2}, \quad (3)$$

где δ — относительная погрешность измерения индивидуальной дозы;

$$N = \sum_i N_i; \quad b_1 = \frac{1}{m_1} \int_0^{\infty} D \sqrt{w(D)} dD;$$

N_i — число сотрудников, получивших дозу в интервале от D_i до $D_i + \Delta D_i$ (индекс i характеризует разбиение дозы на интервалы ΔD_i). Можно вычислить необходимый объем выборки N для заданных погрешности средней дозы и погрешности измерения индивидуальной дозы. Из соотношения (3) следует, что

$$N = [b_1 / (\delta_1 - \delta)]^2.$$

Числовые значения N для профессиональных групп, рассмотренных в настоящей работе, приведены в работе [12].

Таким образом, каждая профессиональная группа характеризуется своими параметрами плотности распределения доз и определенной численностью. Рассмотренный подход позволяет определить необходимый объем выборки для персонала в целом. Тогда возникает вопрос о том, как оптимальным образом распределить общий объем выборки по профессиональным группам для уменьшения статистической погрешности измерения моментов плотности распределения доз. Анализ погрешности вычисления моментов плотности распределения доз позволяет решить эту задачу.

Рассмотрение сводится к решению задачи на условный экстремум. Получены аналитические решения для случаев, когда плотности распределения доз представлены в виде гистограмм или аналитических зависимостей. Вычислены значения оптимального объема выборки для каждой профессиональной группы.

На основе приведенных материалов рассчитана вероятность превышения заданной дозы ($1/3$ ПДД) для различных профессиональных групп. Для персонала, проводящего рентгенодиагностику и внутрисполостную терапию традиционными методами введения источников, она составляет 0,3; радиоизотопную диагностику традиционными методами — 0,035; дистанционную терапию — $3 \cdot 10^{-5}$ и при эксплуатации генераторов — 0,3.

Таким образом, при рентгенодиагностике, радиоизотопной диагностике с помощью генераторов короткоживущих изотопов (на первом этапе их использования) проведение индивидуального контроля обязательно. При использовании методов дистанционной автоматизированной полостной терапии и традиционных методов радиоизотопной диагностики индивидуальный контроль за уровнями облучения персонала проводить нецелесообразно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросьянц А. М. От научного поиска к атомной промышленности. Современные проблемы атомной науки и техники в СССР. Изд. 3-е. М., Атомиздат, 1976.
2. Польский О. Г., Голиков В. Я. В кн.: Материалы III научно-практич. конф. по радиационной безопасности. М., изд. ВЦНИИОТ, 1976, с. 7.
3. Польский О. Г., Коренков И. П., Калошин В. М. «Изоотопы в СССР», 1977, № 47, с. 23.
4. Hork J. «Jaderna energie», 1974, v. 20, N 10, p. 331.
5. Сиборг Г. «Атомная техника за рубежом», 1972, № 4, с. 38.
6. Afterloading in Radiotherapy. N.Y., 1971, p. 302.
7. Павлов А. С. и др. IV Женевск. конф., 1971. Докл. СССР № 437.
8. Павлов А. С., Пирогов А. М., Трахтенберг А. Х. Лечение рака легкого. М., «Медицина», 1978, с. 258.
9. Иванов В. И., Салимов О. Н. В кн.: Вопросы дозиметрии и защиты от излучений. Вып. 18. М., Атомиздат, 1979, с. 65.
10. Sources and Effects of Ionizing Radiation. U.N. Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation. Rep. to the General Assembly. N.Y., 1977.
11. Салимов О. Н., Иванов В. И., Клейменова Л. В. Распределение доз среди персонала рентгеновских кабинетов в зависимости от профессии. Труды конф. «Грудь и здоровье медицинских работников». Паланга, 19—21 сент. 1977.
12. Голиков В. Я. и др. В кн.: Тезисы докл. 2-й Всесоюз. науч. конф. по защите от ионизирующих излучений ядерно-технических установок. М., изд. МИФИ, 1978, с. 93.

Поступила в Редакцию 03.07.79

УДК 621.384.6.01

Нелинейная зависимость эффектов интенсивности от числа частиц в кольцевом токе

Арутюнян С. Г. Нагорский Г. А.

Расчет ускорителей и накопителей на большие токи существенно зависит от эффектов интенсивности, т. е. от влияния собственного поля пучка на динамику его движения. Обычно это поле находится из уравнений Максвелла, в правую часть которых подставляют усредненные значения заряда и тока пучка.

Кроме того, делается предположение о совпадении полей зарядов пучка с полем равномерно и прямолинейно движущейся заряженной частицы [1].

В настоящей работе рассмотрена задача самодействия кольцевого тока (расчеты для более сложных конфигураций тока затруднены). Для полей частицы, движущейся по окружности с постоянной скоростью, выписаны точные формулы Лиенара—Вихерта [2]. Затем с помощью метода суммирования Плана [3] найдена сила Лоренца, действующая на одну из частиц со стороны всех остальных. В полученных формулах видна нелинейная зависимость от числа частиц в кольцевом токе. Рассмотрены различные частные случаи полученных формул.

Показано, что в ультрарелятивистском случае для рассматриваемой задачи при любой плотности тока нельзя пользоваться приближением поля прямолинейно движущегося заряда.

Одновременная картина поля. Найдем электрические и магнитные поля, создаваемые частицей с энергией γ в единицах mc^2 , движущейся по окружности радиуса R , в точке наблюдения с координатами $(\rho + R, \Phi, z)$ в цилиндрической системе координат в момент времени t .

Вектор от частицы в запаздывающий момент времени t' , направленный в точку наблюдения, удобно представить в виде $\frac{R\Delta}{\beta} [v_1 e_1(\theta) + v_2 e_2(\theta) + v_3 e_3]$, где e_i — орты цилиндрической системы координат; $\theta = -\Delta < 0$ — азимут частицы в запаздывающий момент времени; βc — скорость частицы. Направляющие косинусы v_1, v_2, v_3 равны:

$$\begin{aligned} v_1 &= (\beta/\Delta) [(1 + \rho/R) \cos(\Phi + \Delta) - 1]; \\ v_2 &= (\beta/\Delta) [1 + \rho/R] \sin(\Phi + \Delta); \\ v_3 &= (\beta/\Delta) (z/R). \end{aligned} \quad (1)$$

Для определения Δ получим $\Delta^2/\beta^2 = 1 + (1 + \rho/R)^2 - 2(1 + \rho/R) \cos(\Phi + \Delta) + (z^2/R^2)$. (2)