

5. М. А. Стырикович, К. Я. Катковская, Е. П. Серов. Парогенераторы электростанций. М., «Энергия», 1966.
6. Г. Л. Петров. Гидравлика переменной массы. Харьков, Изд-во Харьковск. ун-та, 1964.
7. И. С. Коченов. Теория подобия и ее применение в теплотехнике. Труды МИИТ. Вып. 139. М., 1961, стр. 158.
8. С. С. Кутателадзе, А. И. Леонтьев. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. Новосибирск, Изд-во СО АН СССР, 1962.
9. Олсон, Эккерт. «Прикладная механика», № 1, 3 (1966).
10. И. С. Коченов, В. В. Васильев, Л. И. Баранова. В кн. «Тепло и массоперенос». Т. 1. Минск, Изд-во АН БССР, 1965, стр. 131.

К расчету мощностей поглощенных доз от γ -источника из отработавших твэлов ядерных реакторов

В. Е. Дроздов

УДК 621.039.83

В настоящее время действует ряд установок, в которых в качестве источников γ -излучения для проведения различных радиационных процессов используются отработавшие твэлы ядерных реакторов.

В работах [1—4] показано, что распределение активности по длине четырех типов твэлов удовлетворительно описывается функцией косинуса. В работе [2] приведены формулы для расчета поля мощностей доз (ПМД) от отработавшего твэла в воздухе. Там же показано, что неравномерность ПМД для одного типа твэлов на близких расстояниях (~ 7 см) $K = 4^*$, тогда как максимальная неравномерность ПМД для линейного источника с равномерно распределенной активностью $K = 2$.

Как правило, при осуществлении радиационных процессов твэлы окружены веществом той или иной плотности. В большинстве случаев эти вещества по своим ядерным свойствам близки к воде (различные полимерные изделия, каучуки, биологические объекты и др.). Для проведения радиационных процессов с такими источниками излучения необходимо рассчитать поле мощностей поглощенных доз (ПМПД) по объему облучаемого объекта. При этом для проведения радиационно-химических процессов с блочными объектами неравномерность ПМПД в различных точках объекта обычно не должна превышать $\pm 5 \div 10\%$.

Вывод формулы для расчета ПМПД

Длина и диаметры твэлов обычно такие, что их, как правило, можно считать линейными источниками. Пусть длина линейного источника $2L$ (рис. 1); активность по его длине распределена по закону косинуса. Мощность поглощен-

ной дозы в произвольной точке с координатами R и z для энергии E_γ равна

$$P_k = K'_\gamma m_0 \left[\int_{-L}^L \frac{A_1 \cos px e^{-\mu' \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx}{(x-z)^2 + R^2} + \int_{-L}^L \frac{A_2 \cos px e^{-\mu'' \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx}{(x-z)^2 + R^2} \right]. \quad (4)$$

Здесь $K'_\gamma = K\psi$; K_γ — γ -постоянная радиоактивного изотопа; ψ — коэффициент перевода рентгена в рады [5]; $m_0 = \frac{Mp}{2 \sin pL}$, где $2M$ — полная активность линейного источника, $p = \frac{\pi}{2(L+\Delta L)}$ (ΔL — эффективная добавка отражателя с торца активной зоны); $\mu' = (1 + \alpha_1)\mu$; $\mu'' = (1 + \alpha_2)\mu$, где μ — линейный коэффи-

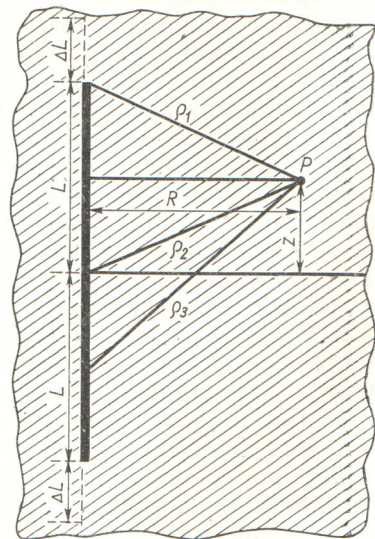


Рис. 1. Схема к расчету мощностей поглощенных доз от линейного источника с косинусоидальным распределением активности.

* Заметим, что $K = \frac{P_{\text{сред}}}{P}$, где $P_{\text{сред}}$ и P — мощность дозы над серединой и над любой произвольной точкой источника соответственно.

коэффициент ослабления γ -излучения в веществе; $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ — коэффициенты для учета многократного рассеяния (с помощью факторов накопления) в веществе (см., например, работу [6]).

Расчет ПМПД по формуле (1) с использованием коэффициентов A и α для источников со сложным спектром (например, для обработавших твэлов) затрудняется [7]. Это можно упростить, если фактор накопления B (μR_0) находить в интегральной форме сразу для протяженного источника [7]. Согласно работе [7]

$$\mu R_0 = \ln \frac{P_k(\mu R = 0)}{P_k(\mu R)},$$

где $P_k(\mu R)$ и $P_k(\mu R = 0)$ — мощность дозы в точке (без учета многократного рассеяния) при наличии поглощающего вещества и без него соответственно.

На основании работы [2] имеем

$$P_k(\mu R = 0) = K_{\gamma} m_0 \left[\left(\frac{1}{R} - \frac{\alpha z^2}{R} + R \right) \times \right. \\ \left. \times \left(\operatorname{arctg} \frac{L-z}{R} + \operatorname{arctg} \frac{L+z}{R} \right) - \right. \\ \left. - 2\alpha L + \alpha z \ln \frac{(L+z)^2 + R^2}{(L-z)^2 + R^2} \right]. \quad (2)$$

Здесь $\alpha = \frac{p^2}{a}$, где a — корректирующий член [2], характерный для данного типа твэла. Учтя эту, выражение (1) запишем так:

$$P_k = K_{\gamma} m_0 B(\mu R_0) \int_{-L}^L \frac{\cos px e^{-\mu \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx}{(x-z)^2 + R^2}, \quad (3)$$

где $B(\mu R_0)$ выражается через дозовый фактор накопления точечного источника [7].

Интегралы в формуле (3) не выражаются в элементарных функциях и не табулированы. Как и в работе [2], значение $\cos px$ аппроксимируем функцией вида $f(px) \approx 1 - \frac{p^2 x^2}{a}$.

Подставляя $f(px)$ в (3), получим

$$P_k = K_{\gamma} m_0 B(\mu R_0) \left[\int_{-L}^L \frac{e^{-\mu \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx}{(x-z)^2 + R^2} - \right. \\ \left. - \alpha \int_{-L}^L \frac{x^2 e^{-\mu \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx}{(x-z)^2 + R^2} \right]. \quad (4)$$

Дважды заменив переменные в (4), получим набор табулированных интегралов, кроме одного интеграла вида

$$J = \int_{-L}^L \sqrt{1 - \frac{R^2}{(x-z)^2 + R^2}} e^{-\mu \sqrt{(x-z)^2 + R^2}} dx. \quad (5)$$

Разложение в (5) подкоренного выражения в ряд также дает набор табулированных интегралов вида $E_n(\mu R)$. Необходимую степень точности $\sim 1 \div 5\%$ получим, если при разложении в ряд выражения (5) возьмем три члена.

После интегрирования и некоторых алгебраических преобразований получим выражение для мощности поглощенной дозы в веществе от косинусоидального линейного источника:

$$P_k = K_{\gamma} m_0 B(\mu R_0) \left\{ \frac{1-\alpha z^2}{R} [F_1(\mu R, \theta_1) + \right. \\ \left. + F_2(\mu R, \theta_2)] + 2\alpha z [E_1(\mu R_1) - \right. \\ \left. - E_1(\mu R_2)] - \frac{\alpha}{\mu} [2 \exp(\mu R) - \exp(\mu R_1) - \right. \\ \left. - \exp(\mu R_2)] + \frac{\alpha R}{2} \left[2E_2(\mu R) - \frac{R}{R_1} E_2(\mu R_1) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{R}{R_2} E_2(\mu R_2) \right] + \frac{\alpha R}{8} \left[2E_4(\mu R) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{R^3}{R_1^3} E_4(\mu R_1) - \frac{R^3}{R_2^3} E_4(\mu R_2) \right] \right\}, \quad (6)$$

где

$$\theta_1 = \operatorname{arctg} \frac{L-z}{R}; \quad \theta_2 = \operatorname{arctg} \frac{L+z}{R};$$

$$R_1 = \sqrt{(L-z)^2 + R^2}; \quad R_2 = \sqrt{(L+z)^2 + R^2};$$

$$F(\mu R, \theta) = \int_0^{\theta} e^{-\mu R \sec \theta} d\theta \quad (\text{см. работу [7]});$$

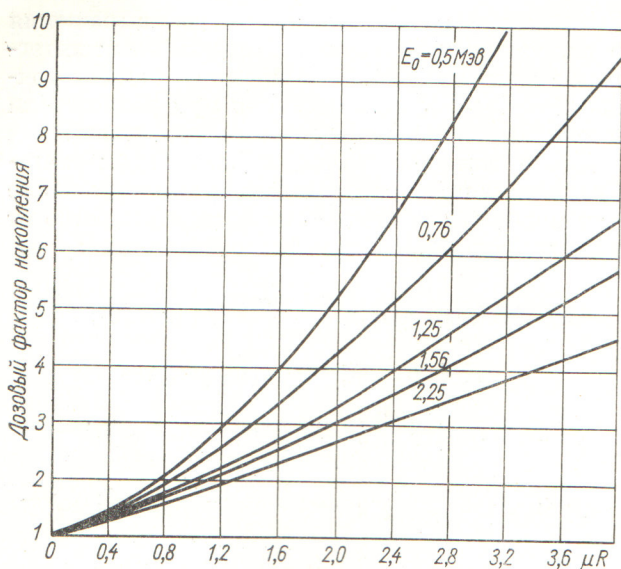
E_1, E_2, E_4 — набор табулированных интегралов вида

$$E_n = (\mu R)^{n-1} \int_{\mu R}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y^n} dy. \quad (7)$$

Факторы накопления точечного изотропного источника $B(\mu R)$ в воде для спектра осколков деления, вычисленные по данным работы [6], представлены на рис. 2 для значений $\mu R = 0 \div 4$. Этого достаточно для решения практических задач. Для $z=0$ и $z=L$ выражение (6) значительно упрощается.

Ошибка в расчетах по формуле (6) составляет $\sim 1 \div 5\%$ для рабочих значений $R \approx 0,1L \div L$ и $z = 0 \div \frac{L}{2}$, что достаточно для решения практических задач.

Приведенные выражения могут быть использованы при расчете ПМПД для любых облуча-



Р и с. 2. Дозовый фактор накопления в воде для точечного изотропного источника.

телей (плоских, цилиндрических и др.), состоящих из набора косинусоидальных линейных источников. Мощность поглощенной дозы от косинусоидального линейного источника (P_k) в среднем сечении больше, а на уровне концов меньше, чем от равномерного линейного источника (P_p), так что всегда есть точка, где $P_k = P_p$.

Максимальное отношение $P_k/P_p = \eta$, как следует из формул (2), (6), имеет место в среднем сечении твэла ($z = 0$) при $R \rightarrow 0$ и равно $\eta_{z=0} = m_0$. Минимальное отношение P_k/P_p получается при $z = L$ для $R \rightarrow 0$ и равно $\eta_{z=L} = m_0 (1 - \alpha z^2)$.

Соответственно максимальная неравномерность ПМПД от твэла при $R \rightarrow 0$ равна

$$K = \frac{P_{k, z=0}}{P_{k, z=L}} = \frac{2}{1 - \alpha L^2} \quad (8)$$

Как видно из (8), при $\alpha L^2 \rightarrow 1$ значение $k \rightarrow \infty$. На практически минимальных расстояниях детектор — источник ($R \approx 4$ см) максимальное значение $k \approx 5$.

При расчете ПМПД от обработавших твэлов в широком диапазоне времени кампании и выдержки (45—200 суток) эффективная энергия внутри энергетического интервала почти не изменяется и может быть принята равной следующим значениям: $E_1 = 0,17 \pm 0,02$ Мэв; $E_2 = 0,50 \pm 0,01$ Мэв; $E_3 = 0,76 \pm 0,01$ Мэв; $E_4 = 1,56 \pm 0,05$ Мэв; $E_5 = 2,25 \pm 0,08$ Мэв.

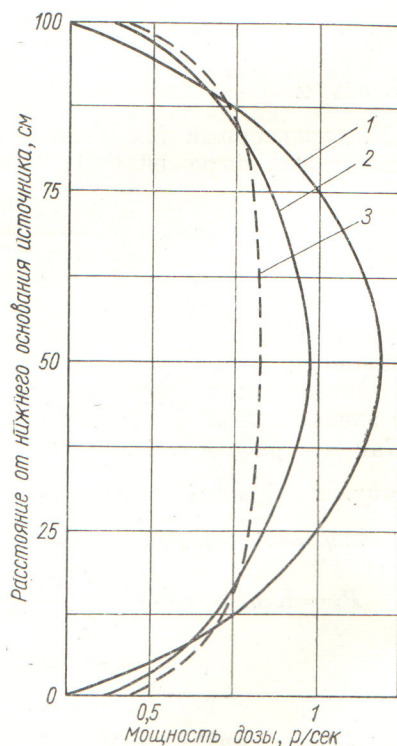
Ниже приведены линейные коэффициенты ослабления γ -излучения продуктов деления в воде [7]:

$E, \text{ Мэв}$	Коэффициент ослабления, см^{-1}
0,17	0,144
0,50	0,0966
0,76	0,0815
1,56	0,0565
2,25	0,0455

Эффективный спектральный состав γ -излучения смеси продуктов деления в зависимости от времени выдержки и продолжительности кампании можно взять, например, из работы [7].

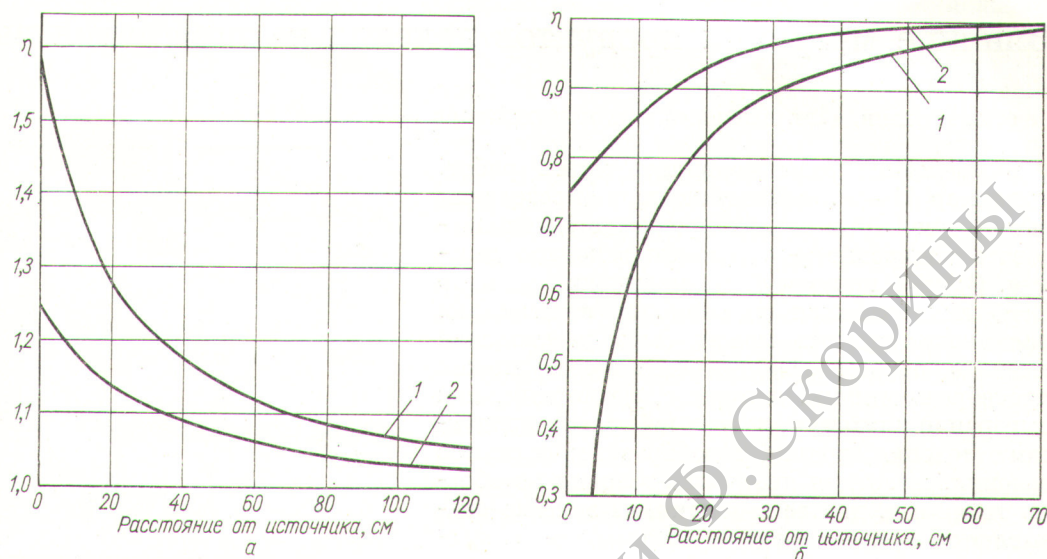
Для иллюстрации применения полученных формул на рис. 3 даны расчеты ПМПД в воде от твэлов длиной $2L = 100$ см при $\frac{\Delta L}{L} = 0$ и $\frac{\Delta L}{L} = 0,4$ с условной активностью 100 г-эвв

Ра каждый для доминирующей γ -линии осколков деления $E_\gamma = 0,76$ Мэв. Там же для срав-



Р и с. 3. Мощность поглощенной дозы в воде от линейных источников с косинусоидальным и равномерным распределением активности для $R = 8$ см и $E_\gamma = 0,76$ Мэв:

1 — $\Delta L/L = 0$; 2 — $\Delta L/L = 0,4$; 3 — равномерный линейный источник.



Р и с. 4. Значение η в воде для $z = 0$ (а) и $z = L$ (б) на различных расстояниях от линейных источников с косинусоидальным и равномерным распределением активности: 1 — $\Delta L/L = 0$; 2 — $\Delta L/L = 0,4$.

нения приведены результаты расчета мощностей поглощенных доз от равномерного линейного источника такой же длины с единичной удельной активностью.

Результаты расчета ПМПД в горизонтальной плоскости от косинусоидального и равномерного линейных источников приведены на рис. 4 в виде безразмерного отношения $\eta = P_k/P_p$. Как видно из рисунков, с увеличением R значение η стремится к единице. При $R = 2L$ максимальное значение $\eta = 1,05$ (при $z = 0$); поэтому при $R = 2L$ и больше ПМПД от твэла можно рассчитывать по формулам для равномерного линейного источника.

Иногда при расчете ПМПД от реального твэла, например от твэла РФТ [8] диаметром 66 мм, на близких расстояниях должна вводиться поправка на конечный диаметр. В случае необходимости следует также вводить поправку и на барьерную геометрию [7].

При расчете ПМПД от твэла со сложным спектром требуется учитывать энергию каждой группы и ее долю в спектре γ -излучения, а полученные результаты сложить.

Вычисленные значения ПМПД для облучателя из твэлов РФТ (с учетом конечного диаметра твэла) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [9].

Автор пользуется случаем выразить благодарность Ю. С. Рябухину, А. В. Ларичеву за обсуждение данной работы; И. М. Захаро-

вой, Н. А. Кузнецову, Н. А. Дроздовой за помощь в расчетах и оформлении работы.

Поступила в Редакцию 21/V 1965 г.
В окончательной редакции 19/XII 1966 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. П. Смирнов-Аверин и др. «Атомная энергия», 8, 446 (1960).
2. В. Е. Дроздов, И. М. Захарова, С. П. Добровольский. «Атомная энергия», 19, 367 (1965).
3. Technical Reports series No. 9, Second annual Report. Vienna, IAEA, 1962.
4. Н. А. Доллежалъ и др. «Атомная энергия», 17, 335 (1964).
5. Единицы активности и дозы ионизирующих излучений. (Рекомендации Международной комиссии по радиологическим единицам и измерениям.) М., Изд-во иностр. лит., 1959.
6. Г. Гольдштейн, Дж. Уилкинс. В сб. «Защита транспортных установок с ядерным двигателем». Под ред. В. В. Орлова, С. Г. Цыпина. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Н. Г. Гусев и др. Защита от излучения протяженных источников. М., Госатомиздат, 1961.
8. В. В. Гончаров и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 243.
9. В. А. Борисов и др. См. настоящий выпуск, стр. 141.