

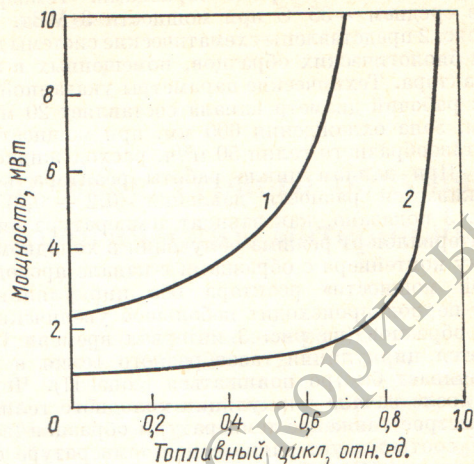
Р и с. 1. Установка для обратимого изменения содержания борной кислоты в теплоносителе ГЦК по замкнутому циклу: 1 — главный циркуляционный насос (ГЦН); 2 — регулирующие вентили; 3 — обратный клапан; 4 — электронагреватель; 5 — испаритель; 6 — разбрызгивающие колонки; 7 — трубопровод подачи водяного пара из испарителя в конденсатор; 8 — конденсатор; 9 — резервный насос; 10 — реактор

ции водяного пара, образующегося в испарителе на струях «холодной» воды при работе разбрызгивающей колонны конденсатора. Для увеличения скорости изменения концентрации борной кислоты в ГЦК при отключенной части ГЦН на линии подачи теплоносителя в испаритель и конденсатор установлен резервный насос.

Чтобы определить мощность электронагревателей испарителя, необходимую для преодоления нестационарного отравления активной зоны реактора  $^{135}\text{Xe}$  при эксплуатации энергоблока АЭС в режиме переменных нагрузок, выполнены соответствующие расчеты. Исследованы режимы работы АЭС с ежесуточной разгрузкой от номинальной мощности до 30% и до нуля и возможностью восстановления мощности до номинальной в любой момент времени.

Расчеты проведены применительно к стационарной топливной нагрузке ВВЭР-440, рассчитанной на 7200 эф. ч. Нейтронно-физические характеристики реактора и их изменение в течение топливного цикла получены расчетом [4, 5], а также в экспериментах на энергоблоках первой очереди Кольской АЭС. В расчетах учтены присутствие в активной зоне реактора управляющей группы кассет и изменение температуры теплоносителя при сбросе мощности.

На рис. 2 приведены результаты расчета необходимой мощности электронагревателей испарителя в различные



Р и с. 2. Расчетная мощность электронагревателей испарителя в различные моменты топливного цикла

моменты цикла выгорания при суточном регулировании мощности энергоблока в диапазонах от 100% до 0 (1) и от 100 до 30% (2). Характер кривых показывает, что в первом случае целесообразная мощность нагревателей испарителя составляет ~10 МВт, во втором 4—5 МВт. Расчеты сделаны с запасом, так как не учитывались снижение мощности реактора с конечной скоростью и возможность разгрузки блоков до уровня собственных нужд при ежесуточных остановках.

Принципиальная возможность применения предложенной установки для изменения содержания борной кислоты в теплоносителе ГЦК была проверена экспериментально на системе компенсации объема блока ВВЭР-440 Кольской АЭС. При эксплуатации блока в компенсаторе объема была достигнута концентрация борной кислоты 20 г/кг в результате работы электронагревателей и сброса водяного пара в барботажный бак.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидоренко В. А. Вопросы безопасной работы реакторов ВВЭР. М., Атомиздат, 1977.
2. Баканов А. В. «Атомная техника за рубежом», 1975, № 6, с. 4.
3. Сидоренко В. А. «Атомная энергия», 1977, т. 43, вып. 5, с. 333.
4. Семенов В. Н. Препринт ИЭА-2157. М., 1971.
5. Петруния Д. М., Беляева Е. Д., Киреева И. Л. Препринт ИАЭ-2518. М., 1975.

Поступило в Редакцию 07.04.78

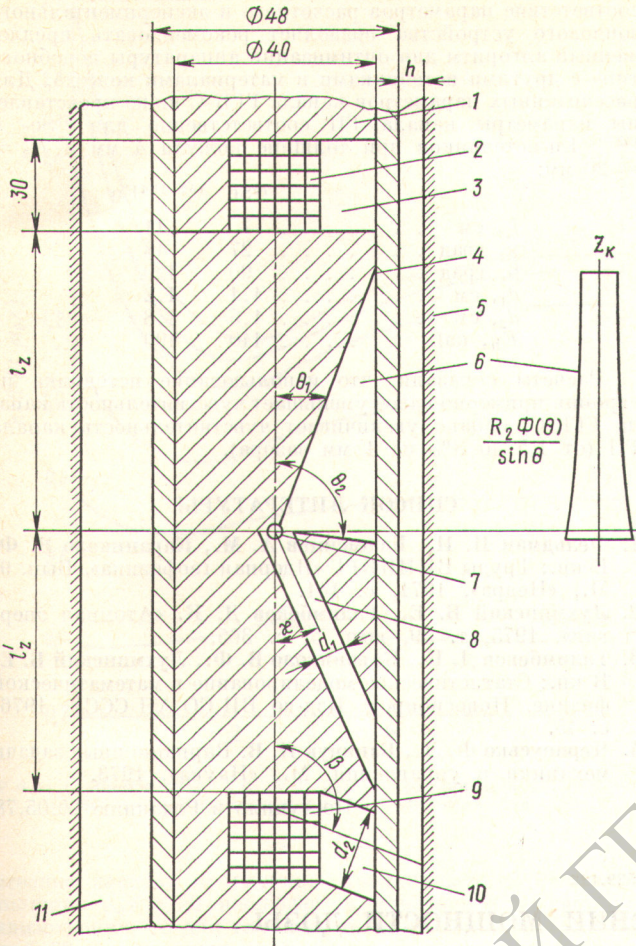
УДК 550.835:539.125.52

## Оптимизация зондового устройства для селективного гамма-гамма-каротажа

ГАЛИМБЕКОВ Д. К., ЛУХМИНСКИЙ В. Е.

Предложенное в работе [1] зондовое устройство для селективного гамма-гамма-каротажа (ГГК-С) специального типа со щелевым коллиматором источника обеспечивает определение эффективного атомного номера  $Z_0$  горных пород и позволяет исключить мешающее влияние их

переменной плотности  $\rho$ . Опыт его использования показал, что необходимо учитывать мешающее влияние микрокаверн или зазора  $h$ , появляющегося между прибором и стеной скважины на кавернозных участках ее ствола.



Р и с. 1. Геометрия двухзондового устройства ГГК-С: 1 — цилиндрический свинцовый экран; 2, 3 — детектор и приемный коллиматор канала ГГК-С; 4 — алюминиевый кожух прибора; 5 — горная порода; 6 — выходной щелевой коллиматор канала ГГК-С; 7 — источник  $\gamma$ -квантов; 8 — выходной коллиматор канала ГП; 9, 10 — детектор и приемный коллиматор канала ГП; 11 — среда, заполняющая скважину

В настоящей работе рассматривается задача оптимизации двухзондового прибора ГГК, состоящего из канала ГГК-С и гамма-профилемера (ГП), измеряющего  $h$  (рис. 1).

Исходная система уравнений для определения  $Z_0$  и  $h$  с учетом возможного взаимного влияния каналов имеет вид

$$\begin{aligned} J_1 &= I_1(\rho, Z_0, h, G_1) + \varepsilon_1(\rho, Z_0, h, G); \\ J_2 &= I_2(\rho, Z_0, h, G_2) + \varepsilon_2(\rho, Z_0, h, G), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $J_1, J_2$  — общие показания каналов ГГК-С и ГП соответственно;  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  — возмущение в каналах, обусловленное полем излучения соседнего канала;  $I_1, I_2$  — потоки регистрируемого излучения, несущие основную информацию об измеряемых параметрах горной породы;  $G_1, G_2$  — совокупности варьируемых параметров конструкций каналов ГГК-С и ГП в пространстве параметров  $G$ .

Оптимизация сводится к отысканию совокупности параметров, обеспечивающей максимум векторной целевой функции  $\eta(G)$ , выбираемой как чувствительность к изме-

ряемому параметру по каждому каналу, т. е.

$$\eta(G^*) = \max_G \left( \frac{1}{J_1} \left| \frac{\Delta J_1}{\Delta Z_0} \right|, \frac{1}{J_2} \left| \frac{\Delta J_2}{\Delta h} \right| \right). \quad (2)$$

Задается допустимый уровень мешающих факторов

$$\left( \frac{1}{J_1} \left| \frac{\Delta J_1}{\Delta \rho} \right|, \frac{1}{J_1} \left| \frac{\Delta J_1}{\Delta h} \right|, \frac{1}{J_2} \left| \frac{\Delta J_2}{\Delta \rho} \right|, \frac{1}{J_2} \left| \frac{\Delta J_2}{\Delta Z_0} \right| \right) \leq (\delta_{11}, \delta_{12}, \delta_{21}, \delta_{22}), \quad (3)$$

где  $\delta_{ij}$  — малая величина, ограничивающая влияние  $j$ -го мешающего фактора на показание  $i$ -го канала.

Требуется, чтобы взаимное влияние каналов не превышало заданного уровня  $g$  (например, 40%):

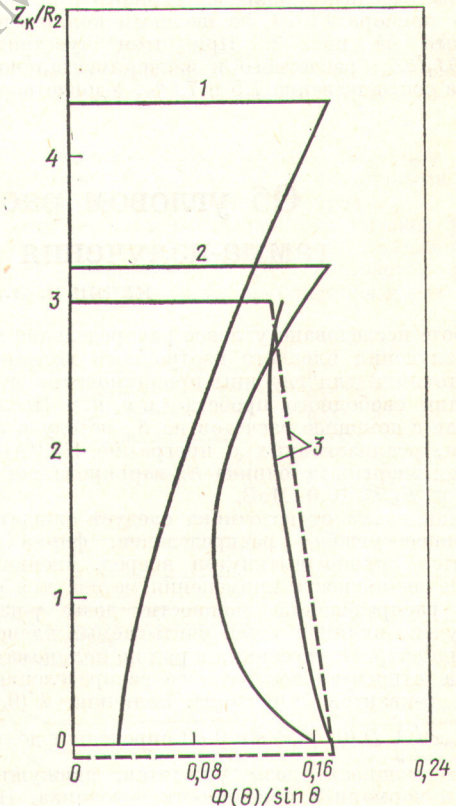
$$g \left( \frac{J_1}{J_2} \right) \geq \left( \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right). \quad (4)$$

Ограничения (3), (4) должны быть дополнены условиями

$$\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2; Z_1 \leq Z_0 \leq Z_2; 0 \leq h \leq h_{\text{макс}}, \quad (5)$$

задающими интервалы изменения  $\rho, Z_0, h$ .

В практически интересной области значений параметров  $G$  возмущение  $\varepsilon_1$  пренебрежимо мало по сравнению с  $J_1$ . Это позволяет разделить задачу (2) — (5), т. е. сначала независимо оптимизировать канал ГГК-С, а потом канал ГП с учетом возмущения канала ГГК-С.



Р и с. 2. Диаграмма для определения формы и размеров щелевого коллиматора источника и длины оптимального зонда ГГК-С  $l_1, Z_K, \Phi(\theta)/\sin \theta$  даны в единицах радиуса свинцового экрана  $R_2$ : 1, 2 — зонд ГГК-С с Eu- и Se-источниками ( $Z_K/R_2 = 6$  и  $3,6$  соответственно); 3 — расчетный (—) и экспериментальный (---) варианты с Se-источником ( $Z_K/R_2 = 3,25$ )

На первом этапе оптимизации канала ГГК-С решается прямая задача ГГК. При этом используется метод Монте-Карло, реализуемый с помощью пакета программ МОК [2, 3]. Совокупность параметров  $G_1$  включает длину зонда  $l$ , углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и форму щелевого коллиматора источника  $\Phi(\theta)$ . Результаты решения прямой задачи аппроксимируются гладкими функциями по всем переменным [3]. Далее вариационными методами [4] для ряда значений  $l$ ,  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  подбирается форма щелевого коллиматора  $\Phi(\theta)$ , обеспечивающая выполнение условий (3). Анализ показывает, что рост чувствительности  $J_1$  к  $Z_0$  связан с уменьшением диапазона изменения  $\rho$ . Поэтому  $\delta_{11}$  целесообразно взять равной статистическим и аппаратным погрешностям.

При оптимизации канала ГП используется близость геометрии канала к геометрии однократного рассеяния. Совокупность параметров  $G_2$  включает расстояние  $l'$ , диаметры коллимационных отверстий  $d_1$ ,  $d_2$ , углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и нижний порог энергии  $E_n$  регистрируемых  $\gamma$ -квантов. На первом этапе проводится приближенная оптимизация с использованием аналитических выражений однократного рассеяния для  $I_2$  и аппроксимационных формул для  $\epsilon_2$ . Последующие уточнения, учитывающие эффект многократного рассеяния, находятся прямыми расчетами с помощью пакета программ МОК.

Данная схема была реализована при выборе оптимальной конструкции приборов с источниками  $^{75}\text{Se}$  и  $^{152}\text{Eu}$  —  $^{154}\text{Eu}$ , предназначенных для исследования горных пород плотностью от 2,0 до 4,5 г/см<sup>3</sup> и с эффективным атомным номером от 13 до 22 (руды черных металлов, бокситы и др.). Для оценки достоверности предложенной оптимизационной схемы рассчитан один из вариантов конфигурации опытного прибора ГГК-С со щелевым коллиматором [1], показанный на рис. 2. При этом чувствительность  $(1/\Delta J_1) (\partial J_1 / \partial Z_0)$  расчетного и экспериментального каналов равна соответственно 7,5 и 7,8%. Удовлетворительное

соответствие параметров расчетного и экспериментального зондового устройства позволяет рекомендовать предложенный алгоритм для оптимизации аппаратуры подобного типа с другими источниками и материалами кожуха. Для рассчитанных параметров канала ГГК-С ниже представлены параметры канала ГП соответственно для  $^{75}\text{Se}$ - и  $^{152-154}\text{Eu}$ -источников при толщине кожуха 4 мм и  $R_2 = 20$  мм:

	$^{75}\text{Se}$	$^{152-154}\text{Eu}$
$l_z$ , см	7	11
$\alpha$ , град	27	18
$\beta$ , град	90	120
$d_1$ , см	1,1	1,2
$d_2$ , см	1,5	1,8
$E_n$ , кэВ	110	190

Расчеты показали, что использование источника из европия примерно вдвое уменьшает чувствительность канала ГГК-С, однако увеличивает чувствительность канала ГП (от 1,5 до 3% на 1 мм зазора).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фельдман И. И., Блюменцев А. М., Караниколо В. Ф. В кн.: Труды ВНИИЯГ «Ядерная геофизика». Вып. 9. М., «Недра», 1971, с. 141.
2. Лухминский Б. Е., Галимбеков Д. К. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 5, с. 365.
3. Галимбеков Д. К., Караниколо В. Ф., Лухминский Б. Е. В кн.: Статистическое моделирование в математической физике. Новосибирск, Изд-во ВЦ СО АН СССР, 1976, с. 45.
4. Черноушко Ф. Л., Баничук Н. В. Вариационные задачи механики и управления. М., «Наука», 1973.

Поступило в Редакцию 29.05.78

УДК 539.121:539.122

## Об угловом распределении мощности дозы гамма-излучения при глубоком проникновении

Кучин Н. Л., Попков К. К., Трофимов И. Н.

В работе исследовано угловое распределение мощности дозы  $\gamma$ -излучения плоского изотропного моноэнергетического источника для глубины проникновения в вещество до 50 длин свободного пробега (д. с. п.). Исследование выполняли с помощью расчетов по  $S_n$ -методу в  $S_6P_6$ -приближении, реализованных в программе КУРАГА-М [1]. Начальная энергия источника  $E_0$  варьировалась в диапазоне  $0,5 \leq E_0 \leq 10,0$  МэВ.

Так как вдали от источника следует ожидать сугубо анизотропное угловое распределение, форма которого оказывается сильно вытянутой вперед, специально исследовали возможность применения метода для описания угловых распределений мощности дозы  $\gamma$ -излучения. Было изучено влияние числа учитываемых членов разложения индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра  $l$  на относительное угловое распределение мощности дозы  $\gamma$ -квантов  $k(\theta, \mu_0 x)$ . Величина  $k(\theta, \mu_0 x) = D(\theta, \mu_0 x) / \int D(\theta, \mu_0 x) \sin \theta d\theta$  определяет долю вклада в полную мощность дозы  $\gamma$ -квантов, движущихся под углом  $\theta$  к нормали к поверхности источника. На рис. 1 представлена зависимость  $k(\theta = 0, \mu_0 x, l)$  для плоского изотропного источника  $\gamma$ -излучения в железе с  $E_0 = 8,0$  МэВ. Тенденция приближения кривых к асимптотическому значению при  $\mu_0 x > 30$  и  $l \geq 6$  позволяет заключить, что дальнейшее увеличение  $l$  вряд ли приведет к повышению точности расчетов. Для контроля качества

получаемой информации использовали также метод Монте-Карло в виде модификации, предусматривающей задание первого столкновения равномерно по толщине защиты с глубокой степенью расщепления (до 50 поверхностей). На рис. 2 представлены относительные угловые распределения мощности дозы  $\gamma$ -квантов плоского изотропного источника при  $E_0 = 1,0$  (а) и 8,0 (б) МэВ, рассчитанные  $S_n$ -методом и методом Монте-Карло. Результаты расчетов согласуются в пределах погрешности метода Монте-Карло, которая не превышает 30% на глубине 30 д. с. п. Анализ полученных данных показал, что характер углового распределения мощности дозы  $\gamma$ -излучения суще-

Таблица 1

Коэффициенты  $\theta_0$  для асимптотической формы углового распределения мощности дозы  $\gamma$ -излучения, град

Вещество	$E_0$ , МэВ							
	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0
Вода	51,0	35,0	23,5	20,0	17,5	15,6	14,5	13,7
Бетон	33,0	27,5	20,8	18,5	17,0	15,8	15,4	14,8
Железо	25,6	23,0	19,5	18,0	16,9	16,3	15,9	15,9