

ГАММА—ГАММА-КАРОТАЖ С ГЕНЕРАТОРОМ ГАММА-КВАНТОВ

Е. М. ФИЛИППОВ

(Представлено II межвузовской конференцией по электронным ускорителям)

Метод радиоактивного каротажа, основанный на измерении интенсивности рассеянного гамма-излучения какого-либо источника гамма-квантов, помещаемого в тот же глубинный прибор, в котором находится индикатор излучения, с целью определения плотности горных пород, пересеченных скважиной, получил название гамма—гамма-каротажа (ГГК).

Знание плотности горных пород помогает в определении их пористости, которая необходима для подсчета запасов нефтяных и газовых месторождений. Весьма широкое применение метод ГГК находит при изучении угольных и рудных скважин.

Помимо этого метод ГГК может применяться также для решения технических задач: для отбивки уровня цементного кольца в затрубном пространстве скважин и для определения местоположения соединительных муфт на обсадной колонне.

Применявшиеся при ГГК до сих пор естественные и искусственные источники излучения имеют, как известно, энергию гамма-квантов не выше 3 Мэв. При исследовании скважин методом ГГК можно применять также источники гамма-квантов мощностью не выше 30 мкСи, в противном случае это будет приводить к нарушению техники безопасности. Глубинность исследования горных пород методом ГГК при использовании этих источников невелика, поэтому влияние неровностей стенок скважины приводит к уменьшению точности определения плотностей пород. Применение при ГГК генераторов гамма-квантов (таких, как бетатрон), позволяющих получать излучение большой энергии и мощности, должно значительно повысить эффективность данного метода.

Рассмотрим, в какой мере увеличение энергии и мощности источника гамма-квантов способствует увеличению глубинности и чувствительности метода ГГК. Для этого рассмотрим 3 вопроса: зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения от начальной энергии источника гамма-квантов и расстояния между индикатором и источником гамма-квантов; зависимость глубины исследования горных пород от начальной энергии источника гамма-квантов; зависимость спектрального состава рассеянного излучения от плотности горных пород и от начальной энергии источника гамма-квантов.

1. Исследование зависимости интенсивности рассеянного гамма-излучения от начальной энергии источника гамма-квантов для случая однородной среды.

При исследовании этого вопроса воспользуемся выражением для интенсивности рассеянного излучения, приведенным в работе [1]:

$$j = \frac{Q \exp(-\tau_{cp} l)}{4 \pi l^3} \quad (1)$$

Здесь Q — мощность источника гамма-квантов; l — расстояние между центром индикатора и источником гамма-квантов (размер зонда); $v = 3,5 - \sqrt{0,25 + 2(1 - \cos \Theta)^2}$ — коэффициент, зависящий от среднего косинуса угла многократно рассеянного гамма-излучения ($\cos \Theta$); $\tau_{cp} = (1 - \cos \Theta) \bar{\lambda}$ — средний коэффициент поглощения гамма-излучения при многократном рассеянии. Величина $\bar{\lambda}$ представляет собой среднюю длину свободного пробега многократно рассеянного гамма-излучения.

Величина $\bar{\lambda}$ с учетом фотоэффекта или эффекта образования электронно-позитронных пар вычисляется по следующей формуле:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\sum_{\kappa=1}^n \alpha_{\kappa} \bar{R}_{\kappa}^2}{2 \sum_{\kappa=1}^n \alpha_{\kappa}}} \quad .$$

Здесь α_{κ} — весовые поправки, учитывающие поглощение рассеянного гамма-излучения за счет фотоэффекта или эффекта образования электронно-позитронных пар; $\bar{R}_{\kappa}^2$ — средний квадрат длины свободного пробега рассеянного гамма-излучения в горных породах, который определяется из следующего выражения:

$$\bar{R}_{\kappa}^2 = \sum_{i=0}^n r_i^2 + \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n 2 r_i r_j \cos \Theta_{ij} \quad ,$$

где $\bar{r}_i$ и r_j — средние длины свободного пробега гамма-квантов между отдельными актами рассеяния;

$\bar{r}_i^2$ — средний квадрат длины свободного пробега гамма-квантов между отдельными актами рассеяния;

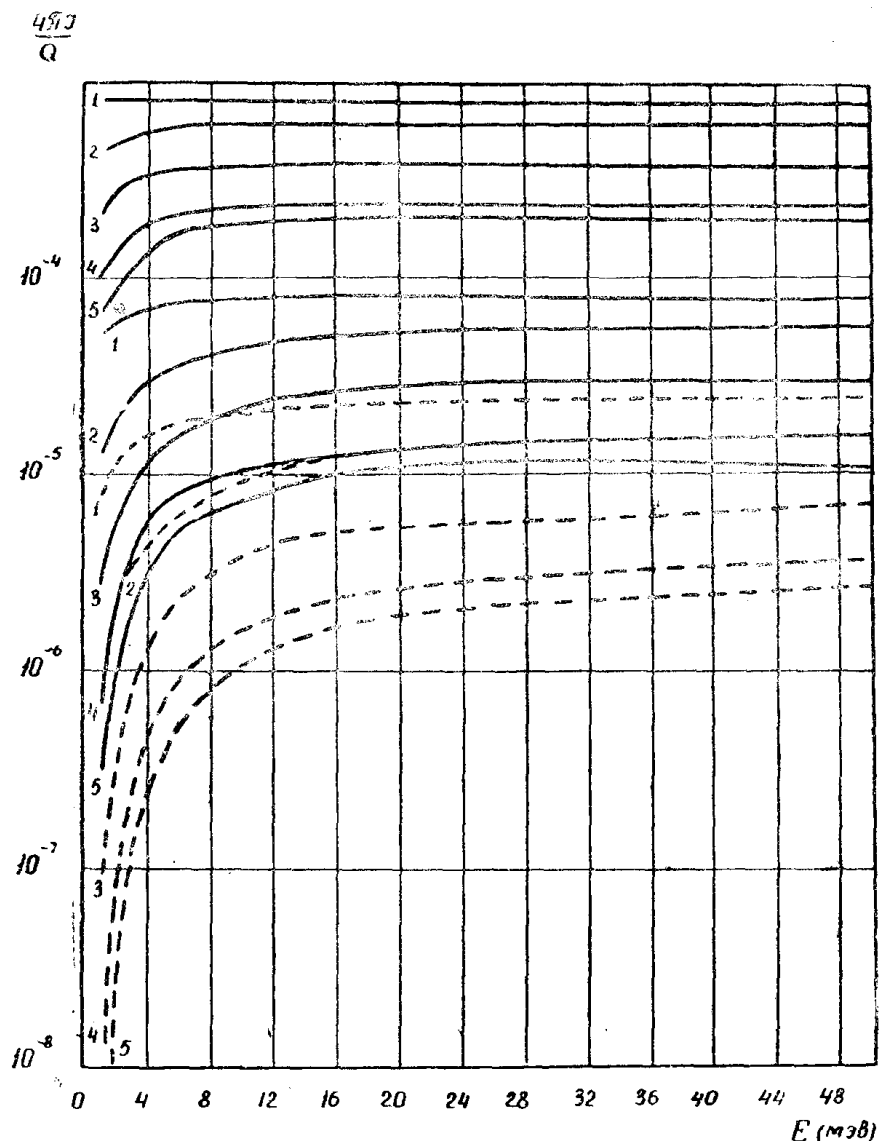
$\cos \Theta_{ij}$ — средний косинус угла рассеяния при переходе гамма-кванта из состояния i в состояние j .

Подробная схема расчета всех величин, входящих в выше упомянутые формулы, приведена в работе [1]. Там же, а также в работе [2], приведено сопоставление расчетных данных с экспериментальными для кобальтового источника излучения. Результаты расчета удовлетворительно совпадают с данными опыта.

Полученная по формуле (1) зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения от начальной энергии источника гамма-квантов для горных пород (руд) плотностью 1, 2, 3, 4 и 5 г/см³ и соответствующим им эффективным атомным номерам¹⁾ 7,42; 11,4; 15,67; 19,3; 22,6 показана на фиг. 1. Кривые, приведенные на этом рисунке, отвечают случаю применения интегрального индикатора гамма-квантов. Из фиг. 1 помимо известной зависимости интенсивности рассеян-

¹⁾ При исследовании взаимодействия гамма-излучения со средами сложного химического состава вместо отдельных атомных номеров элементов, составляющих эти среды, вводят эффективные атомные номера [1].

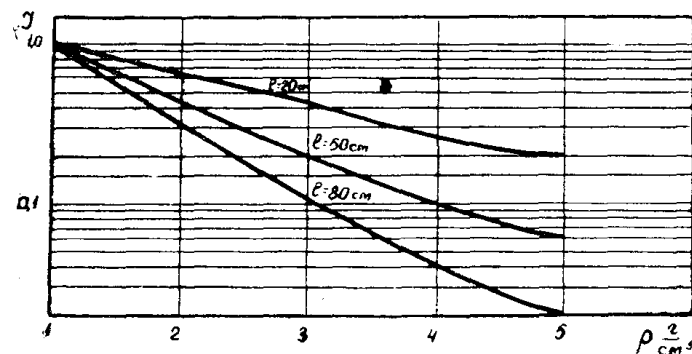
ного гамма-излучения от плотности среды видно также, что начальную энергию источника гамма-квантов (при исследовании скважин методом ГГК) в зависимости от плотности излучений среды и размера зонда целесообразно увеличивать лишь до определенной величины; при последующем увеличении кривая $j=f(E)$ стремится к асимптоте и не меняет характера изучаемой зависимости.



Фиг. 1. Зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения от энергии источника гамма-квантов для трех размеров зонда 20 см (верхние сплошные кривые 1÷5), 50 см (нижние сплошные кривые 1÷5) и 80 см (пунктирные кривые). Шифр кривых соответствует плотности породы в г/см³

Так, например, для размера зонда 20 см нецелесообразно применять источники гамма-квантов с начальной энергией выше 8 Мэв, а для зонда 80 см — выше 15 Мэв. Это обусловлено тем, что гамма-кванты с увеличением их начальной энергии при рассеянии в меньшей степени изменяют направление своего движения. Поэтому при исследовании скважин методом ГГК на малых зондах рассеянное излучение от источников высокой энергии в меньшей степени будет достигать индикатора излучения, чем при исследовании на больших зондах.

Применение больших зондов при исследовании скважин методом ГГК выгодно в связи с тем, что увеличение размера зонда приводит к возрастанию чувствительности метода ГГК к изменениям плотности породы. Это видно, в частности, из кривых, полученных по формуле (1) для зондов 20, 50 и 80 см и источника с начальной энергией 5 Мэв (фиг. 2). Аналогичный характер имеют зависимости и для других энергий источников гамма-квантов. Однако применение больших



Фиг. 2. Зависимость интенсивностей рассеянного гамма-излучения (в относительных единицах j') от плотности породы для трех размеров зонда (20, 50 и 80 см) и источника с начальной энергией 5 Мэв

размеров зонда требует также увеличения мощности источника гамма-квантов. Выше отмечалось, что по технике безопасности при исследовании скважин методом ГГК нельзя использовать естественные или искусственные источники гамма-квантов мощностью свыше 30 мкСи. Поэтому в настоящее время практически невозможно применять зонды размером свыше 50 см, не нарушая технику безопасности.

Использование в этой связи управляемых с поверхности генераторов гамма-квантов, таких, как бетатрон, в качестве источников большой мощности позволит значительно увеличить чувствительность метода ГГК к изменениям плотности горных пород и руд за счет увеличения размера зонда.

Применение больших размеров зонда выгодно еще и потому, что это приводит к увеличению глубины исследования горных пород, а следовательно, и к увеличению пробега гамма-излучения в этих породах. Данное обстоятельство в свою очередь будет приводить к более точному определению плотности пород и руд, что и покажем ниже.

2. Расчет глубинности исследования горных пород и их объема, рассеивающего излучение.

Глубиной (или глубинностью) исследования горных пород, пересеченных цилиндрической скважиной, будем считать расстояние по направлению радиуса скважины от ее стенки до некоторой цилиндрической поверхности, рассеянное излучение от которой достигает еще индикатора гамма-квантов, расположенного на оси скважин.

Глубину исследования горных пород определим из выражения для интенсивности рассеянного излучения. Интенсивность гамма-излучения j , рассеиваемого в породе объема v , в зависимости от начальной энергии источника гамма-квантов, плотности породы и координат при расположении индикатора и точечного источника гамма-квантов па оси скважин определяется следующим выражением:

$$J = \frac{Q \rho A_0}{32 \pi^2} \int_V \frac{d\Omega}{d\Omega} \frac{\exp \left[-\frac{r-R_0}{r} \left(\tau R_1 + \tau_{cp} R_2 \right) \right]}{R_1^2 (R_{21}^2 + b R_{21} R_{22} + R_{22}^2)} dv, \quad (2)$$

где Q — мощность источника гамма-квантов;

A_0 — число Авогадро;

ρ — плотность породы;

R_0 — радиус скважины;

r — расстояние от оси скважины до рассеивающего объема по направлению радиуса скважины;

R_1 и R_2 — соответственно расстояние от точечного источника до рассеивающего объема и от рассеивающего объема до индикатора;

R_{21} — путь гамма-кванта по направлению R_2 в породе;

R_{22} — то же в воздухе скважины ($R_2 = R_{21} + R_{22}$);

τ — полный линейный коэффициент поглощения и рассеяния первичного излучения в породе;

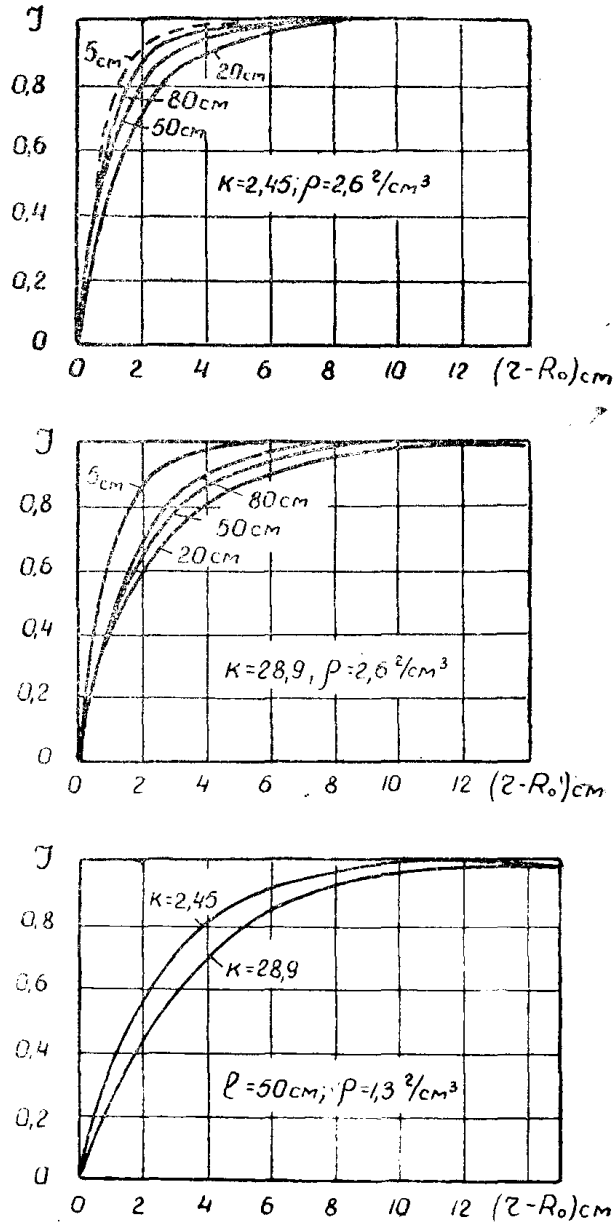
τ_{cp} — средний коэффициент, учитывающий поглощение гамма-излучения при многократном рассеянии в горной породе по направлению R_2 ;

$\frac{d\sigma}{d\Omega}$ — дифференциальное сечение рассеяния по Клейну-Нишину-Тамму;

b — то же, что и в формуле (1); величина $r - R_0$ в этой формуле отвечает глубине исследования горных пород.

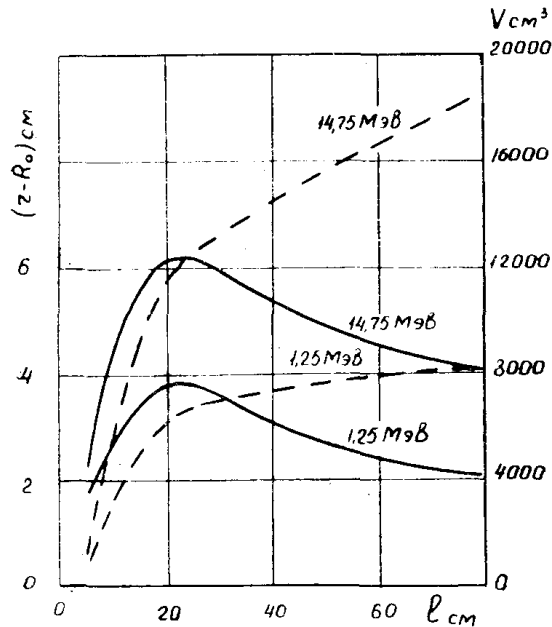
Произведем численный расчет для двух различных сред: угля ($\rho = 1,3 \text{ г/см}^3$ и $Z_{эф} = 6,92$) и осадочной породы ($\rho = 2,6 \text{ г/см}^3$ и $Z_{эф} = 13$) для источников гамма-квантов с энергией 1,25 Мэв ($K = 2,45$) и 14,75 Мэв ($K = 28,9$) для размера зондов 5, 20, 50 и 80 см.

Результаты расчета показаны на фиг. 3. Как видно, увеличение энергии источника гамма-квантов приводит к увеличению глубины исследования горных пород, увеличение плотности горной породы ее эффективного атомного номера приводит к уменьшению глубинности их исследования.



Фиг. 3. Зависимость интенсивности рассеянного гамма-излучения, достигающего индикатора (в относительных единицах), от глубины исследования горных пород

Помимо этого из этих кривых видно также, что с изменением размера зонда глубина исследования меняется. Особенно наглядно это видно из кривых фиг. 4, построенных для случая регистрации 90 % излучения, достигающего индикатора. На этом же рисунке для тех же условий приведена зависимость объема породы, рассеивающего



Фиг. 4. Зависимость глубины исследования осадочной породы $z - R_0$ (сплошные кривые) и ее объема v (пунктирные кривые) от размера зонда

ды, исключительно обусловлено величиной объема породы, рассеивающего гамма-излучение. Все это вызвано тем, что увеличение объема породы, происходящее за счет увеличения размера зонда, приводит к возрастанию пробега гамма-излучения в породе, а следовательно, к большей зависимости интенсивности регистрируемого излучения от параметров среды (плотности и эффективного атомного номера). В связи с этим за оптимальный зонд следует принимать такой, который отвечает выходу кривой $v = f(l)$ на асимптоту.

Таким образом, при исследовании скважин методом ГГК необходимо использовать источники гамма-квантов, имеющих по возможности наибольшую энергию в пределах до 15 Мэв. При этом для источника конкретной энергии необходимо выбирать определенный оптимальный зонд.

Следует отметить, что увеличение начальной энергии источника гамма-квантов не приводит к изменению равновесного спектра рассеянного излучения, что и покажем ниже.

3. Исследование зависимости спектрального состава от плотности горных пород и от начальной энергии источника гамма-квантов.

Выражение, определяющее изменение спектра излучения от его начальной энергии в какой-либо среде, имеет следующий вид:

$$\tau(K) \varphi(K) = \int_K^{K_0} \varphi(K') \Gamma(K, K') dK' + Q \delta(K_0 - K), \quad (3)$$

где $\varphi(K)$ — функция распределения рассеянного гамма-излучения по энергии K ;

го гамма-излучение, которое достигает индикатора гамма-квантов. Из фиг. 4 видно, что:

а) максимальные значения глубины исследования горных пород соответствуют зонду размером 20 см, что обусловлено наиболее оптимальными условиями рассеяния гамма-излучения;

б) объем же породы, рассеивающей излучение, с возрастанием размера зонда стремится к асимптоте, причем тем медленнее, чем больше начальная энергия источника гамма-квантов.

Таким образом, увеличение размера зонда, приводящее к возрастанию чувствительности метода ГГК к изменениям плотности сре-

$\tau(K)$ — полный линейный коэффициент поглощения и рассеяния гамма-излучения в веществе;

$\Gamma(K, K')$ — вероятность перехода гамма-кванта из состояния с энергией K' в состояние с энергией K ;

$\delta(K_0 - K)$ — дельта-функция Дирака;

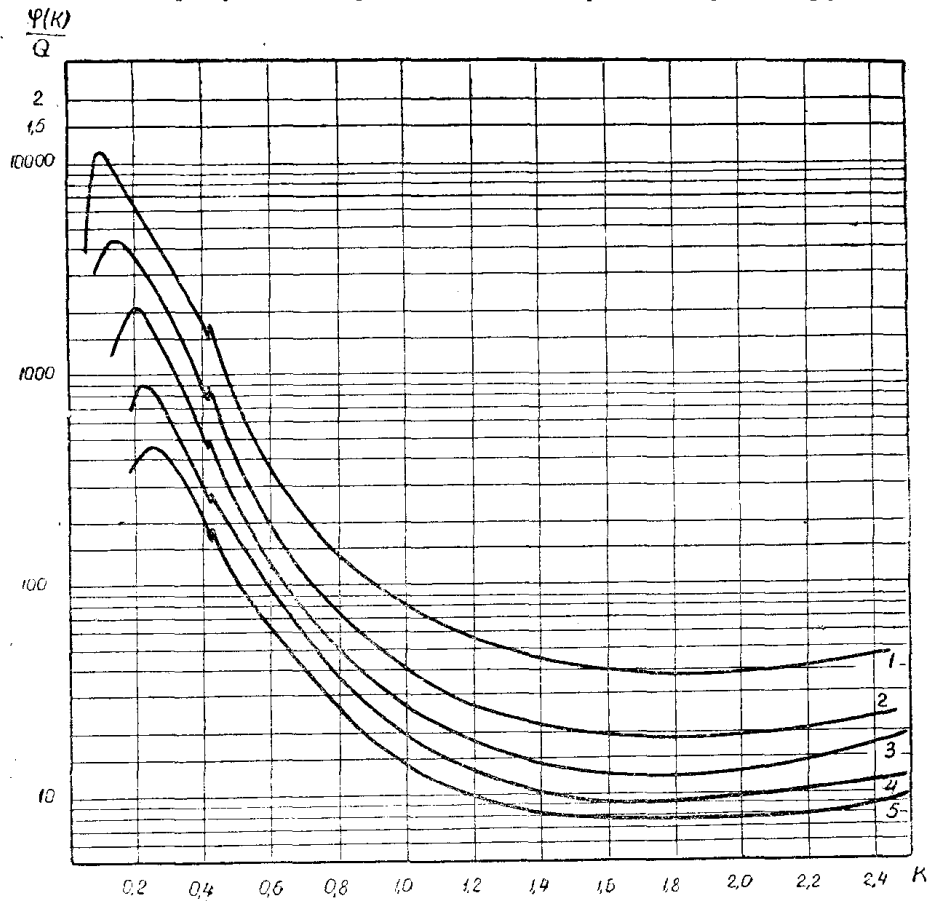
Q — мощность источника гамма-квантов;

K_0 — начальная энергия источника гамма-квантов в единицах энергии покоящегося электрона;

K — интересующая нас энергия гамма-квантов (в тех же единицах, что и K_0).

Путем введения среднего косинуса угла однократно рассеянного гамма-излучения ядро $\Gamma(K, K')$ можно свести к вырожденному $\Gamma(K')$, а интегральное выражение (3) к дифференциальному, решение которого не представит особых трудностей и подробно разобрано в работе [3]¹⁾.

Энергетические спектры кобальтового источника гамма-кванта, полученные в результате расчета для горных пород и руд с плотно-



Фиг. 5. Зависимость распределения дифференциального спектра рассеянного гамма-излучения от энергии K для трех сред с плотностью 1, 2, 3, 4, 5 г/см³ (шифр кривых соответствует плотности породы)

стью 1, 2, 3, 4 и 5 г/см³ и соответствующим им эффективным атомным номерам 7,42; 12,74; 15,67; 19,3; 22,6 приведены на рис. 5.

Эти данные интересно сопоставить с результатами численного расчета уравнения (3), полученного П. Р. Карром и И. К. Ламкиным [4]

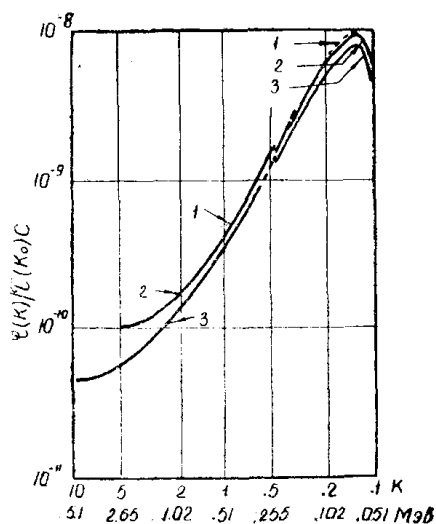
¹⁾ В работе [3] вместо функции $\varphi(K)$ всюду использована ее величина, умноженная на отношение полного коэффициента поглощения и рассеяния гамма-квантов к коэффициенту рассеяния.

для алюминия ($Z = 13$, $\rho = 2,6 \text{ г см}^3$) при различной энергии источника гамма-квантов, приведенными на фиг. 6. Сопоставление этих данных приводит к следующим выводам.

1. В энергетическом спектре рассеянного гамма-излучения в зависимости от плотности среды и ее вещественного состава происходит накопление мягкого гамма-излучения с резко выраженным максимумом, положение которого зависит от свойств среды.

2. Изменение энергии источника гамма-квантов не приводит к смещению максимума мягкой составляющей спектра рассеянного гамма-излучения. Поэтому наличие в излучении бетатрона сложного спектра (белого спектра) не будет приводить к смещению максимума спектра рассеянного излучения.

Таким образом, на основании этих расчетов можно утверждать, что, осуществляя регистрацию максимальных значений энергии мягкой составляющей рассеянного гамма-излучения с помощью дифференциального гамма-спектрометра, можно будет распознавать горные породы, пересеченные скважиной, по их плотности и вещественному составу в случае, если корпус прибора изготовлен из материала, позволяющего пропускать к спектро-



Фиг. 6. Зависимость распределения дифференциального спектра рассеянного гамма-излучения в алюминии от энергии K для трех источников гамма-квантов: 1 — 0,5 МэВ, 2 — 2,55 МэВ и 3 — 5,1 МэВ

метру мягкое гамма-излучение, включая максимум интересующих нас энергий.

В итоге всего вышеизложенного можно наметить следующую методику исследования скважин методом гамма—гамма-каротажа с целью увеличения точности определения плотности горных пород и их вещественного состава:

1. Использовать источники гамма-квантов по возможности с большей мощностью и энергией.
2. Исследование проводить с оптимальным зондом, обеспечивающим по возможности исследование наибольшего объема породы, рассеивающей гамма-излучение.
3. В качестве индикатора гамма-квантов использовать дифференциальный гамма-спектрометр и регистрировать мягкую составляющую часть спектра рассеянного гамма-излучения с целью обеспечения наибольшей чувствительности метода ГГК к изменениям плотности горных пород и их вещественного состава.

В настоящее время применение естественных и искусственных источников гамма-квантов при исследовании скважин методом ГГК позволяет определять плотность горных пород с точностью до $0,1 \div 0,05 \text{ г см}^3$. При выполнении ГГК с бетатроном удастся существенно увеличить точность определения плотности горных пород и руд, пересеченных скважиной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филиппов Е. М. К теории гамма—гамма-каротажа (ГГК). Прикладная геофизика. Гостоптехиздат, в. 17, 1957.
 2. Филиппов Е. М. Гамма—гамма-каротаж. Применение радиоактивных изотопов в нефтяной промышленности (сб. докладов). Гостоптехиздат, 1957.
 3. Филиппов Е. М. Исследование энергетического спектра рассеянного гамма-излучения в горных породах различного минералогического состава и различной плотности. Прикладная геофизика. Гостоптехиздат, в. 19, 1953.
 4. P. R. Karr and J. O. Lamkin. Phys. Rev., **76**, 12, 1949.
-