

Экспериментальные данные $t_{\max}(z)$ предварительно обрабатывали методом наименьших квадратов. В области кипения $t_{\max}(z) = t_s + d_1 \exp(-d_2 z)$, а для закризисной области $t_{\max}(z) = \sum_{i=0}^{n=3} a_i z^i$. В интервалах разбиения $t_{\max}(z)$ аппроксимировалась линейной зависимостью, а интегралы для выражений (6) и (11) вычисляли по методу Симпсона. Физические свойства были отнесены к максимальной температуре. Профиль скорости для кольцевого канала вычисляли по закону $1/7$ [4].

После определения $\bar{t}(z)$ были рассчитаны температура внутренней стенки $t_c(z)$, наружной $t_{c1}(z)$ и локальные тепловые потоки (см. рисунок).

Предлагаемая методика позволяет рассчитать локальные тепловые потоки на всей длине парогенерирующего канала по измеренной температуре натрия

на адиабатной стенке. В месте кризиса теплообмена наблюдается существенное отличие тепловых потоков, рассчитанных по $t_{\max}(z)$, от потоков, полученных по $\bar{t}(z)$. Справедливость принятых допущений подтверждается хорошим совпадением расчетных и измеренных значений температуры на наружной стенке трубки.

Поступило в Редакцию 28/II 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллов П. Л. «Атомная энергия», 1962, т. 13, вып. 5, с. 481.
2. Dwyer O., Tu P. «Nucl. Sci. and Engng», 1963, v. 15, N. 1, p. 58.
3. Abecassis G. e. a. «Bull. Direct. etudes et rech., ser. A.», 1967, N 4, p. 681.
4. Хинце П. О. Турбулентность. М., Физматгиз, 1953.

УДК 550.835

Об эффективных коэффициентах ослабления фотонов в гетерогенных средах

АРЦЫБАШЕВ В. А., ЛЕМАН Е. П.

При анализе горных пород и руд ядерно-геофизическими методами, основанными на применении фотонного или γ -излучения, исследуются гомогенные и гетерогенные среды, которые состоят из определяемого элемента А и наполнителя Н. Гомогенная среда соответствует анализу тонкодисперсных порошковых проб, а гетерогенная — условиям естественного залегания руд.

Известно, что ослабление фотонов в гомогенной и гетерогенной средах подчиняется экспоненциальному закону Бэра [1—3]:

$$N = N_0 \exp(-\bar{\mu} x), \quad (1)$$

где N_0 — поток квантов с энергией ε на поверхности среды; N — тот же поток на глубине x ; ρ — плотность среды; $\bar{\mu}$ — массовый коэффициент ослабления квантов в среде. Если исследуемая среда гомогенная, то под $\bar{\mu}$ понимается ее средний массовый коэффициент, который для двухкомпонентной системы равен

$$\bar{\mu}_{\text{ср}} = \bar{\mu}_A q + \bar{\mu}_H (1 - q), \quad (2)$$

где q — концентрация определяемого элемента А в среде; А и Н — значение массового коэффициента определяемого элемента либо наполнителя. $\bar{\mu}_{\text{эф}}$ — эффективный массовый коэффициент ослабления, который зависит не только от концентрации рудных зерен определяемого элемента, но и от их формы, размеров, ориентации. Существует несколько способов расчета этого коэффициента. Например, в работе [2] рассчитаны эффективные массовые коэффициенты ослабления фотонов частицами различной формы. Недостаток этого расчета состоит в том, что в нем не учтено влияние среды, вмещающей рудные зерна, а полученные значения $\bar{\mu}_{\text{эф}}$ относятся лишь к рудной фазе, состоящей из зерен, а не к гетерогенной среде в целом. Этот недостаток устраняется в расчетах [3] и других авторов, использовавших предложенную схему [1]. В частности, для гетерогенной среды с рудными зёрнами, имеющими

форму куба с ребром D , согласно схеме расчета [3],

$$\bar{\mu}_{\text{эф}} = \frac{\rho_H}{\rho} \bar{\mu}_H + \frac{q}{\rho_A D} [1 - e^{-(\bar{\mu}_A \rho_A - \bar{\mu}_H \rho_H) D}], \quad (3)$$

где q — концентрация рудных зерен в среде; ρ — средняя плотность гетерогенной среды, которая выражается через плотности наполнителя ρ_H и рудного зерна ρ_A следующим образом:

$$\rho = \rho_A \rho_H / [\rho_A + (\rho_H - \rho_A) q].$$

Из формулы (3) видно, что при $\bar{\mu}_H \rho_H > \bar{\mu}_A \rho_A$ величина $\bar{\mu}_{\text{эф}}$ может принимать отрицательные значения. Это ограничивает применимость формул для $\bar{\mu}_{\text{эф}}$, получаемых по схеме [3], когда $\bar{\mu}_A \rho_A > \bar{\mu}_H \rho_H$. В то же время введение эффективных коэффициентов ослабления существенно упрощает решение теоретических задач, связанных с прохождением γ -квантов через гетерогенные среды. Поэтому обоснование способов расчета этого параметра, свободных от недостатков и ограничений, имеет большое значение для развития теории гамма-методов, и в частности методов прикладной ядерной геофизики.

Рассмотрим вопрос об ослаблении потока квантов монохроматического γ -излучения с энергией ε в полубесконечной гетерогенной среде, которая состоит из однородного наполнителя и рудных зерен, имеющих форму куба с ребром D . Будем считать поверхность среды плоской, падение излучения по отношению к ней нормальным, а ориентацию кубических зерен в среде такой, что их грани параллельны поверхности раздела. Если поток квантов на поверхности среды через площадку D^2 равен N_0 , то его ослабление в наполнителе при прохождении слоя z может быть учтено множителем $\exp[-\bar{\mu}_H \rho (1 - q) z]$, где ρ — средняя плотность гетерогенной среды; q — средняя концентрация рудных зерен в этой среде; $(1 - q)$ — средняя концентрация однородного наполнителя с массовым коэф-

коэффициентом ослабления $\bar{\mu}_H$. Ослабление потока в рудных зернах зависит от их числа и учитывается множителем $\exp(-\bar{\mu}_A \rho_A k D)$, где ρ_A — плотность рудного вещества, из которого состоят зерна; $\bar{\mu}_A$ — его массовый коэффициент ослабления; k — число рудных зерен в гетерогенной среде, встретившихся в объеме $v = D^3 x$ на пути x . Тогда поток квантов на глубине x равен

$$N = N_0 \exp[-\bar{\mu}_H \rho (1-q)x] \exp(-\bar{\mu}_A \rho_A k D).$$

Если считать, что случайное распределение рудных зерен в гетерогенной среде подчиняется закону Пуассона, то вероятность появления k рудных зерен на пути x равна $P_k = n^k e^{-n}/k!$, где n — среднее число рудных зерен в объеме исследуемой среды $v = D^3 x$ при их средней концентрации q , равное $n = \rho q x / \rho_A D$. Тогда поток квантов на глубине x равен

$$N = N_0 \exp[-\bar{\mu}_H \rho (1-q)x] \sum_{k=0}^{\infty} \exp(-\bar{\mu}_A \rho_A k D) P_k = \\ = N_0 e^{-x \rho \left\{ \bar{\mu}_H (1-q) + \frac{q}{\rho_A D} [1 - e^{-\bar{\mu}_A \rho_A D}] \right\}},$$

где выражение в квадратных скобках показателя экспоненты есть не что иное, как эффективный массовый коэффициент ослабления фотонов в гетерогенной среде с кубическими рудными зёрнами, т. е.

$$\bar{\mu}_{\text{эф}} = \bar{\mu}_H (1-q) + \frac{q}{\rho_A D} [1 - e^{-\bar{\mu}_A \rho_A D}]. \quad (4)$$

Если размер зерен уменьшается ($D \rightarrow 0$), то $\bar{\mu}_{\text{эф}} \rightarrow \bar{\mu}_{\text{ср}} = \bar{\mu}_H (1-q) + \bar{\mu}_A q$, т. е. выражение для эффективного массового коэффициента ослабления излучения в гетерогенной среде переходит в формулу для среднего массового коэффициента ослабления гомогенной среды. Выражение (4) отличается от решений [2] тем, что здесь эффективные коэффициенты ослабления характеризуют не рудную зернистую фазу, а гетерогенную среду в целом. При сравнении с результатами расчетов Л. И. Шмониной [3] видно, что выражение (4) в показателе экспоненты не содержит множителя $(\bar{\mu}_A - \bar{\mu}_H)$, а следовательно, оно справедливо при любых соотношениях между $\bar{\mu}_A$ и $\bar{\mu}_H$, в том числе и при $\bar{\mu}_H > \bar{\mu}_A$. Если в формуле (4) заменить $\bar{\mu}$ на τ или σ , то получим соответствующие выражения эффективных коэффициентов фотопоглощения или рассеяния для гетерогенной среды. Аналогичным путем можно получить выражения $\bar{\mu}_{\text{эф}}$ для гетерогенных сред с частицами другой геометрической формы. Например, для двухкомпонентной гетерогенной среды, состоящей из однородного наполнителя и рудных зерен сферической

формы с диаметром D

$$\bar{\mu}_{\text{эф}} = \bar{\mu}_H (1-q) + \\ + \frac{3}{2} \frac{q}{\rho_A D} \left\{ 1 - \frac{2}{\bar{\mu}_A^2 \rho_A^2 D^2} [1 - (1 + \bar{\mu}_A \rho_A D) e^{-\bar{\mu}_A \rho_A D}] \right\}. \quad (5)$$

Полученные решения легко обобщаются для многокомпонентной гетерогенной среды. В частности, для трехкомпонентной гетерогенной среды, состоящей из гомогенного наполнителя H и кубических рудных зерен сортов A и M , с размерами D_A и D_M , массовый эффективный коэффициент ослабления

$$\bar{\mu}_{\text{эф}} = \bar{\mu}_H (1-q_A - q_M) + \frac{q_A}{\rho_A D_A} [1 - e^{-\bar{\mu}_A \rho_A D_A}] + \\ + \frac{q_M}{\rho_M D_M} [1 - e^{-\bar{\mu}_M \rho_M D_M}], \quad (6)$$

где q_A и q_M — концентрация зерен A и M в гетерогенной среде; ρ_A и ρ_M — плотности рудного вещества, из которого состоят зерна A и M . Нетрудно также рассчитать $\bar{\mu}_{\text{эф}}$ для гетерогенной среды, в которой рудная фаза представлена зёрнами одной формы, но различных размеров. Если многокомпонентная гетерогенная среда содержит однородный наполнитель и разнообразные рудные частицы кубической формы, то

$$\bar{\mu}_{\text{эф}} = \bar{\mu}_H \left(1 - \sum_{(i,j)} q_{ij} \right) + \sum_{(i,j)} \frac{q_{ij}}{\rho_{ij} D_{ij}} [1 - e^{-\bar{\mu}_{ij} \rho_{ij} D_{ij}}], \quad (7)$$

где i — сортность частиц по составу, а j — их сортность по размерам.

Выражения, полученные для эффективных коэффициентов ослабления фотонов в гетерогенных средах, могут быть использованы при расчетах γ -полей, а также при решении задач теории защиты или прикладной ядерной геофизики, в частности, при определении интенсивности вторичных излучений (рассеянного γ -излучения, атомной флуоресценции и т. п.) от гетерогенных сред, каковыми являются, например, горные породы и руды.

Поступило в Редакцию 27/I 1977 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Леман Е. П., Орлов В. Н., Медведев Ю. С. Методы разведочной геофизики. Вып. 25. М., ВНИИгеофизика, 1975, с. 83.
2. Хиславский А. Г., Плотников Р. И., Кохов Е. Д. «Заводск. лаборатория», 1973, т. 39, № 6, с. 691.
3. Шмонин Л. И., Потребенников Г. К. Геофизические поиски рудных месторождений. Т. 2^я (Ядерная геофизика). Алма-Ата, изд. Всес. ин-та разведочной геофизики, 1971, с. 143.