

Р и с. 6. Экспериментальная зависимость к. п. д. рекуперации от энергии первичного пучка W

Р и с. 7. Экспериментальная зависимость к. п. д. прямого преобразования энергии от угла влета пучка θ

Затем исследовали зависимость к. п. д. от угла входа пучка в систему в диапазоне $0^\circ \leq \theta \leq 10^\circ$ (при энергии пучка $W = 3,8$ кэВ и постоянном магнитном поле). Кривая зависимости $\eta(\theta)$ изображена на рис. 7. С увеличением угла входа к. п. д. резко уменьшается, так как пучок попадает на промежуточные электроды, не испытав полного торможения или, наоборот, ускорившись после прохождения вершины траектории. Так, при угле $\pm 2^\circ$ (0,035 рад) к. п. д. уменьшается до 80%.

На рис. 3, 4 сравниваются теоретически рассчитанные и экспериментально полученные зависимости $\eta(\gamma)$ и $\eta(\theta)$. Более низкие экспериментальные значения к. п. д. объясняются в основном дискретностью системы. С увеличением числа собирающих пластин к. п. д. системы возрастает (с 80% при $N = 5$ до 90% при $N = 10$).

В связи с отмеченной зависимостью к. п. д. рекуператора от ширины пучка и его расходимости в настоящее время проводятся исследования системы с неоднородным электрическим полем в целях получения более высоких к. п. д. для широких плотных расходящихся пучков ионов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виноградова О. А. и др. «Атомная энергия», 1978, т. 45, вып. 1, с. 18.
2. Виноградова О. А. и др. В кн.: Докл. Всесоюз. конф. по инженерным проблемам термоядерных реакторов. Т. 2. Л., 1977, с. 47.
3. Виноградова О. А. и др. «Атомная энергия», 1977, т. 42, вып. 5, с. 411.
4. Семашко Н. Н. и др. [2], с. 7.
5. Семашко Н. Н. и др. Там же, с. 28.

Поступила в Редакцию 30.01.80

УДК 550.882.52

О разрешающей способности гамма-каротажа

ПРИТЧИН Б. П.

Разрешающая способность γ -каротажа имеет некоторый предел, зависящий от условий регистрации каротажных диаграмм: точности измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) γ -излучения и характера диаграммы чувствительности детектора. Этот предел может быть достигнут только при использовании метода интерпретации, определенным образом согласованного с условиями каротажа. В настоящей статье на примере двух методов интерпретации показано, как влияют особенности алгоритма решения обратной задачи γ -каротажа на его разрешающую способность.

При решении обратной задачи каротажа имеет смысл рассматривать модели разреза, в которых изменение радиоактивности ограничивается направлением оси скважины z . Обычно применяемые детекторы γ -излучения имеют изотропную (в плоскости, перпендикулярной к оси скважины) диаграмму чувствительности, и это исключает возможность обоснованно применять модели разреза более сложной структуры.

Наиболее совершенной при данном ограничении моделью является распределение гамма-излучателей, описываемое функцией произвольного вида $\varphi(z)$, которая может иметь конечное число разрывов первого рода. (Модель разреза и функция $\varphi(z)$ здесь и далее используются как синонимы).

Отвечающее этой модели решение обратной задачи есть решение интегрального уравнения

$$I(\xi) = \int_a^b G(\xi, z) \varphi(z) dz, \quad (1)$$

где $I(\xi)$, $\xi \in [c, d]$ — МЭД γ -излучения на отрезке $[c, d]$ оси скважины; $G(\xi, z)$ — непрерывная в прямоугольнике $\xi \in [c, d]$, $z \in [a, b]$ функция, называемая ядром уравнения. Она однозначно связана с диаграммой чувствительности детектора и имеет смысл МЭД γ -излучения в точке ξ , вызванной единичным содержанием гамма-излучателей, сосредоточенных в точке z . Обратная задача в такой постановке неразрешима прежде всего потому, что для этого необходимо аналитическое задание функции $I(\xi)$; практически $I(\xi)$ можно получить лишь в виде графика или соответствующего цифрового кода и только приближенно. Кроме того, интегральное уравнение Фредгольма первого рода, каким является уравнение (1), представляет собой из-за неустойчивости решения типичный пример некорректной задачи [1].

Таким образом, модель разреза, задаваемая функцией $\varphi(z)$ произвольного вида, не может быть основой для разработки практических приемов решения обратной задачи. Естественным и

логичным упрощением этой модели будет приближение $\varphi(z)$ кусочно-постоянной функцией $\varphi_k(z)$, которая сохраняет постоянные значения в пределах слоев, ограниченных параллельными плоскостями. Если скважина пересекает среду перпендикулярно к плоскостям раздела, расстояние между ближайшими плоскостями постоянно и равно h . Функцию $\varphi_k(z)$ можно рассматривать как вектор (φ_k) .

Если вместе с переходом $\varphi \rightarrow \varphi_k$ ($k = 1, 2, \dots, n$) аналогичным образом сделать замену $I \rightarrow I_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), то вместо интегрального уравнения (1) можно записать систему линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=1}^n a_{ik} \varphi_k = I_i, \quad (2)$$

где элемент матрицы a_{ik} представляет собой значение МЭД γ -излучения слоя мощностью h с единичным содержанием гамма-излучателей. При этом слой отнесен к точке k , а значение МЭД соответствует точке i .

Системой (2) обратная задача сводится к определению содержания гамма-излучателей в каждом из n слоев по значениям МЭД γ -излучения, измеренным в n точках оси скважины. Вектор (φ_k) , удовлетворяющий системе (2), в общем случае является лишь приближенным решением обратной задачи, отвечающим кусочно-постоянному распределению гамма-излучателей. Наиболее простой вариант кусочно-постоянной модели используется в широко известном методе определения средней концентрации гамма-излучателей по площади под графиком каротажной диаграммы [2]. Вследствие сильного упрощения модели разреза метод не эффективен при детальном изучении сложных разрезов.

Детальность решения обратной задачи в постановке (2) может быть повышена, для чего следует уменьшить h . Однако уменьшение h допустимо только в определенных пределах, так как одновременно снижается обусловленность системы (2) и теряется устойчивость ее решения. Действительно, каротажная диаграмма характеризуется определенной гладкостью, и при достаточно малом h смежные значения МЭД будут практически одинаковыми: $I_i \approx I_{i+1}$. Тогда из непрерывности ядра $G(\zeta, z)$, которое заменяет матрица (a_{ik}) , следует

$$I_i / I_{i+1} \approx a_{ik} / a_{i+1, k} \approx 1. \quad (3)$$

Выполнение условия (3) хотя бы для одного i приведет к тому, что матрица (a_{ik}) будет близка к вырожденной. Это значит, что плоскости P_i и P_{i+1} , определяемые уравнениями системы (2) с номерами i и $i+1$, почти параллельны, и достаточно небольших изменений $I(\zeta)$, которые при каротаже проявляются как погрешности измерения МЭД γ -излучения, чтобы приближенное ра-

венство $I_i \approx I_{i+1}$ сдвинуть в любую сторону. В результате таких сдвигов угол между плоскостями P_i и P_{i+1} может изменить знак, линия их пересечения сместится в пространстве, что приведет к перемене знака некоторых координат вектора (φ_k) при сохранении весьма больших абсолютных значений из-за малого угла между плоскостями. Таким образом, уменьшение h приводит к неустойчивому решению, которое формально удовлетворительно, но приписывает отдельным слоям невероятно высокое содержание гамма-излучателей, для других слоев содержание оказывается отрицательным, что вообще лишено физического смысла. При интерпретации повторно снятой по одному и тому же разрезу диаграммы решение может весьма сильно отклониться от первоначального.

Если h увеличить, зависимость между уравнениями системы (2) уменьшается, решение приобретает устойчивость, но сглаживается. Следовательно, существует какое-то промежуточное значение $h = h_0$, при котором решение обратной задачи обладает максимальной точностью. Значение h_0 является характеристикой разрешающей способности γ -каротажа.

Оценить оптимальное значение h можно по зависимости погрешности решения от h , воспользовавшись расчетами на модели. Для модельного распределения гамма-излучателей решалась прямая задача γ -каротажа (1) с ядром $G(\zeta, z)$ симметричного по переменной ζ вида, причем $G(\zeta, z) = 0$ для $z \notin [a, b]$; интервал ненулевых значений ядра взят равным $20h_1$. Пробег γ -излучения естественных радионуклидов в горных породах составляет обычно 0,5 м [2], т. е. при отнесении модели к масштабам реальных условий каротажа получаем $h_1 \approx 0,05$ м. В значения $I(\zeta)$ введены погрешности, распределенные по нормальному закону со средним квадратическим отклонением 0,25; 1; 4 и 8% максимального значения $I(\zeta)$. По синтезированному таким образом диаграммам γ -каротажа выполнены решения обратной задачи при увеличении h в геометрической прогрессии: $h_{p+1} = 2h_p$ ($h_1 = 1$; $p = 1, 2, \dots, 6$). Поскольку отрезок $[c, d]$ оставался постоянным, то ранг матрицы (a_{ik}) и размерность системы (2) изменялись при этом в обратной последовательности.

На рис. 1 приведены значения средней квадратической погрешности решения σ в процентах от φ_{\max} в зависимости от h . При увеличении h устойчивость системы (2) возрастает, и погрешность решения резко уменьшается, достигая минимального значения при $h = 2h_1 - 4h_1$. Последующий рост погрешности решения вызван усиливающейся схематизацией модели разреза вследствие уменьшения размерности системы (2). Положение минимумов рассматриваемых зависимостей характеризует разрешающую способность γ -каротажа, которая в данном случае с учетом

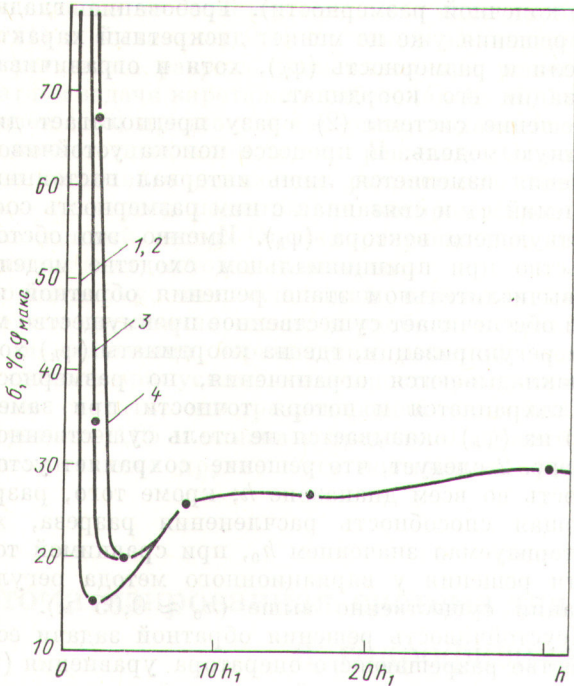


Рис. 1. Зависимость средней квадратической погрешности решения системы (2) от h при $\delta = 0,0025 I_{\max}$ (1); $0,01 I_{\max}$ (2); $0,04 I_{\max}$ (3) и $0,08 I_{\max}$ (4)

масштаба h_1 ($\sim 0,05$ м) составит $0,1-0,2$ м при точности решения $15-20\%$ φ_{\max} .

Понижение размерности системы (2) — не наилучший по разрешающей способности метод получения устойчивого решения обратной задачи. Действительно, понижение размерности системы (2) сопровождается увеличением h , а последнее эквивалентно переходу от непрерывной регистрации $I(\zeta)$ к дискретным измерениям с возрастающим шагом h , ведущему к потере существенных деталей каротажной диаграммы. Большой разрешающей способности можно ожидать от метода интерпретации, дающего устойчивое решение обратной задачи без существенного упрощения исходной информации. Для этой цели предлагается алгоритм, построенный на вариационном методе регуляризации Тихонова [1], который сводит решение интегрального уравнения (1) к минимизации функционала:

$$M = \int_c^d \left[\int_a^b G(\zeta, z) \varphi(z) dz - I(\zeta) \right]^2 d\zeta + \alpha \int_a^b \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 dz, \quad (4)$$

где α — параметр регуляризации.

Минимизация функционала (4) при $\alpha = 0$ дает решение задачи способом наименьших квадратов. Погрешности измерения МЭД γ -излучения при-

водят к тому, что уравнению (1) в этом случае удовлетворяет множество функций $\varphi(z)$, причем среди них возможны такие, которые противоречат смыслу задачи. Поэтому необходимо сузить класс формально допустимых решений, используя ограничения, вытекающие из известных свойств решения. Неустойчивость приводит к решениям в виде сильно осциллирующих функций $\varphi(z)$, в то время как вариации содержания гамма-излучателей в реальных разрезах сравнительно невелики. Поэтому в качестве ограничения можно использовать условие гладкости, обычно формулируемое как условие минимума функционала $\int_a^b \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 dz$. Условие гладкости вводится в выражение (4) с весом α , выбором которого достигается максимальная точность решения. Заметим, что при решении задачи (2) аналогичную роль играет h . Решение системы (2) при $h = h_0$ также можно считать регуляризованным.

Уравнение Эйлера для функционала (4) имеет вид

$$\int_a^b \bar{G}(z, s) \varphi(s) ds - \alpha \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = \int_c^d G(\zeta, z) I(\zeta) d\zeta, \quad (5)$$

$$\text{где } \bar{G}(z, s) = \int_a^b G(\zeta, z) G(\zeta, s) d\zeta.$$

Функция $\varphi(s)$, удовлетворяющая уравнению (5), является экстремалью функционала (4) и одновременно приближенным решением уравнения (1).

Необходимые для численного решения (5) точная аппроксимация функций и замена интегралов суммами, приводят к следующей системе уравнений:

$$\sum_{j=-n}^n \sum_{i=-n}^n \gamma_i G_{ih} G_{ij} h_1^2 \varphi_j - \frac{\alpha}{h_1^2} (\varphi_{k+1} - 2\varphi_k + \varphi_{k-1}) = \sum_{i=-n}^n \gamma_i G_{hi} I_i h_1, \quad (6)$$

где h_1 — шаг сетки аппроксимации функций; γ_i — коэффициенты квадратурной формулы; G_{ih} , G_{ij} , φ_k , φ_i , I_i — значения функций G , φ и I в соответствующих узлах сетки.

Решение системы (6) проводится многократно при разных значениях параметра регуляризации α . Последовательность значений α выбирается в виде геометрической прогрессии $\alpha_p = \mu \alpha_{p-1}$ ($\mu = \text{const}$). На заданной этой прогрессией сетке значений α минимизируется функционал [1]:

$$\Delta(\alpha_p) = \max_{z \in [c, d]} \left| \alpha_p \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha_p} \right| \approx \frac{\mu}{\mu-1} \max_{z \in [c, d]} |\varphi_p - \varphi_{p-1}|. \quad (7)$$

Элемент φ_p , на котором достигается минимум функционала (7), принимается за регуляризованное решение задачи (1).

Возможности решения обратной задачи вариационным методом показаны на рис. 2, где погрешность решения, как и на рис. 1, дана в зависимости от h . Значение h в данном случае варьировалось при моделировании разреза, а не в процессе решения обратной задачи. В качестве исходной взята та же модель, что и при решении системы (2), для нее $h = h_1$. Модели, соответствующие другим значениям h , получены из исходной последовательным усреднением φ_k по удваивающемуся числу смежных интервалов ($2h_1, 4h_1$ и т. д.). Для каждой модели решалась прямая задача, имитировались случайные погрешности разного уровня, и по полученным диаграммам МЭД γ -излучения выполнялось решение обратной задачи.

Давая оценку вариационному алгоритму регуляризации в сравнении с методом регуляризации путем понижения ранга матрицы системы (2), необходимо отметить некоторую разницу в трансформации моделей разреза в процессе решения обратной задачи. При постановке задачи в виде уравнения (1) не возникает существенных с практической точки зрения ограничений на модель — функцию $\varphi(z)$. В процессе решения задачи вариационным методом модель упрощается при переходе к численному алгоритму. Введение сетки с шагом h_1 эквивалентно кусочно-постоянной аппроксимации модели (описанию разреза векто-

ром конечной размерности). Требование гладкости решения уже не меняет дискретный характер модели и размерность (φ_k), хотя и ограничивает вариации его координат.

Решение системы (2) сразу предполагает дискретную модель. В процессе поиска устойчивого решения изменяется лишь интервал постоянных значений φ_k и связанная с ним размерность соответствующего вектора (φ_k). Именно это обстоятельство при принципиальном сходстве моделей на вычислительном этапе решения обратной задачи обеспечивает существенное преимущество метода регуляризации, где на координаты (φ_k) хотя и накладываются ограничения, но размерность его сохраняется и потеря точности при замене $\varphi(z)$ на (φ_k) оказывается не столь существенной. Из рис. 2 следует, что решение сохраняет устойчивость во всем диапазоне h ; кроме того, разрешающая способность расчленения разреза, характеризуемая значением h_0 , при сравнимой точности решения у вариационного метода регуляризации существенно выше ($h_0 \approx 0,05$ м).

Неустойчивость решения обратной задачи есть свойство разрешающего оператора уравнения (1), однако непосредственной причиной, вызывающей существенные отклонения решения от истинного, является приближенный характер уравнения (1) в основном за счет погрешностей измерения МЭД γ -излучения. Поэтому естественно, что разрешающая способность зависит от точности измерения $I(\xi)$ (см. рис. 1, 2). Для практических оценок следует ориентироваться на кривые 3 и 4, полученные для $I(\xi)$, заданной с точностью 4 и 8% максимального значения $I(\xi)$.

Таким образом, предложены и проверены на числовых моделях два алгоритма устойчивого решения обратной задачи γ -каротажа. Показано, что регуляризация решения обратной задачи учитывает условия каротажа и приводит к алгоритму интерпретации, обеспечивающему предельную разрешающую способность метода. Так как регуляризация решения всегда опирается на некоторые ограничения свойств решения, то достигаемая разрешающая способность также зависит от этих ограничений. При этом чем существеннее ограничения, тем выше разрешающая способность. Так, при решении системы (2) постулировалось только постоянство $\varphi(z)$ в пределах интервала h , получена разрешающая способность (0,1—0,2 м в зависимости от точности исходных данных); вариационный метод дополнительно учитывает гладкость решения, ограничения таким образом усиливаются, и разрешающая способность достигает 0,05 м (при прочих равных условиях).

Последний вывод и полученные значения разрешающей способности хорошо согласуются с данными других исследователей. Ограничения решения кусочно-постоянными функциями использовались в работе [3], разрешающая способность при

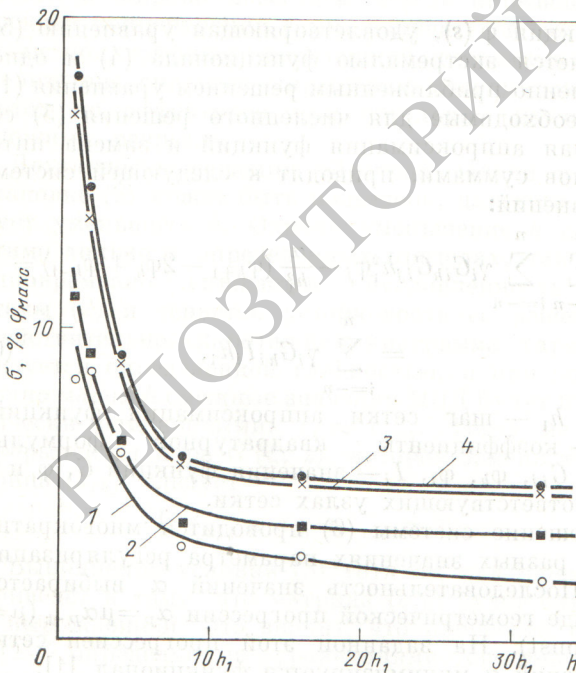


Рис. 2. Зависимость средней квадратической погрешности регуляризованного по Тихонову решения обратной задачи от h (обозначения см. на рис. 1)

этом оценена по свойству гладкости ядра уравнения (1) и составляет 0,15 м; такой же интервал дискретизации разреза применялся при решении обратной задачи каротажа в работе [4]. И. М. Хайковичем [5,6] предложен алгоритм, подавляющий высокочастотные компоненты решения. Ограничение частотного диапазона равносильно требованию гладкости решения, на котором строится вариационный метод. Оценки разрешающей способности этих методов совпадают.

По-видимому, нет оснований надеяться, что найдутся достаточно общие и удобные в практическом отношении ограничения решений, которые существенно усилят возможности γ -каротажа. Можно считать, что разрешающая способность γ -каротажа 0,05 м близка к пределу. Разумеется, не исключаются другие пути повышения эффек-

тивности каротажа — направленный прием и увеличение точности измерений МЭД γ -излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М., «Наука», 1974.
2. Новиков Г. Ф., Капков Ю. П. Радиоактивные методы разведки. М., «Недра», 1965.
3. Реслер Р. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 4, с. 337.
4. Scott J. «Geophysics», 1963, v. XXVIII, № 3, p. 457.
5. Хайкович И. М. В кн.: Вопросы разведочной геофизики. Вып. 5. Л., «Недра», 1968, с. 44.
6. Хайкович И. М., Яковлев В. Н. В кн.: Методы рудной геофизики. Вып. 11. Л., «Недра», 1978, с. 87.

Поступила в Редакцию 18.12.78
В окончательной редакции 05.03.80

УДК 681.3.063:551.464

Автоматизированная система для комплексного изучения радиационных и гидрофизических полей океана

СОЙФЕР В. Н., КОБЫЛЯНСКИЙ В. В., МЯГКИХ А. И., МОЙСЕЙЧЕНКО В. В., РОЖКОВА О. Б.

Для проведения комплексных океанографических исследований, включая изучение радиационных полей, необходимо сконцентрировать на борту судна большой набор технических средств измерений [1]. Важна также оперативная (в реальном масштабе времени) обработка максимально возможного числа синхронных измерений характеристик водной массы и представления их в наглядной форме с помощью ЭВМ. Это обусловлено сравнительно недавно открытой пространственной изменчивостью гидрофизических характеристик океана мезо- и микромасштаба, с одной стороны, и экономическими соображениями при проведении длительных экспедиционных работ, с другой. Аппаратурные комплексы для изучения радиационных полей океана, созданные на основе последних достижений в технике и методологии ядерной физики, можно применять после соответствующей доработки для регистрации некоторого набора гидрофизических и гидрохимических параметров водной среды одновременно с радиометрическими исследованиями.

Разработанная нами автоматизированная система позволяет проводить синхронные измерения дифференциального спектра γ -излучения морской воды и гидрологических параметров: температуры, электропроводности и давления. Регистрация *in situ* дифференциального энергетического спектра γ -излучения обеспечивает периодический контроль за источником излучения морской воды и измерение его интенсивности в выбранном энергетическом интервале («окне»). Задачи увеличения объема передаваемой информации, унифи-

кации системы передачи разнородной информации и повышения ее надежности решены путем использования метода импульсной модуляции сигнала двоичным кодом. В состав системы входят погружной блок, блок приема и расшифровки поступающей на борт информации, анализатор импульсов NTA-1024, программируемая вычислительная машина «Искра-125» и набор периферийных блоков для накопления и отображения информации. Вертикальное зондирование океана разработанным зондом-гамма-спектрометром проводят в целях предварительного изучения структуры водной толщи и оперативного выбора горизонтов отбора проб воды большого объема для анализа радионуклидов, трития, радиоуглерода и других элементов, не измеряемых *in situ*.

Функциональная схема погружной части зонда-гамма-спектрометра показана на рис. 1. В качестве первичных использованы датчики, аналогичные применяемым в настоящее время в термогалинозондах. Для каждого из них разработан преобразователь первичной измеренной величины в цифровой код. Датчиком температуры служит термистор СТ-4-16. Предварительные исследования показали, что этот тип термистора имеет сравнительно небольшой разброс значений сопротивления и наиболее подходит для использования в зонде. Сопротивление термистора с помощью схемы управляемого автогенератора преобразуется в частоту, которая в течение определенного времени записывается в последовательный двоичный счетчик ДС и таким образом кодируется двоичным кодом.