Содержание

Введение

1. Общая характеристика нейтронных методов

2. Схема нейтронных методов

3. Определение влажности грунтов и почв

4. Изучение пористости горных пород

5. Анализ на нейтронопоглощающие элементы

Заключение

Список литературы

# Введение

Нейтрон-нейтронный метод - исследование интенсивности вторичного излучения, возникающего при облучении нейтронами горных пород. Используется для выделения в разрезе водосодержащих и нефтесодержащих пород.

Нейтрон-нейтронный каротаж основан на облучении горных пород быстрыми нейтронами от источника и регистрации нейтронов по разрезу скважины, которые в результате взаимодействия с породообразующими элементами замедляются.

Регистрируемая интенсивность тепловых нейтронов зависит от замедляющей и поглощающей способности горной породы. Наибольшая потеря энергии нейтрона наблюдается при соударении с ядром, имеющего массу равную единице, т.е. с ядром водорода. Таким образом по данным ННКТ можно определять водородосодержание горных пород, которое для пластов-коллекторов напрямую связано с пористостью.

Нейтрон-нейтронный каротаж в комплексе методов общих исследований применяется при решении следующих задач:

литостратиграфическое расчленение разрезов с возможностью построения детальной литостратиграфической колонки;

выделение проницаемых пластов и покрышек (установление их толщин, строения по однородности);

предварительное выделение нефтегазонасыщенных пластов и оценка характера насыщения коллекторов;

определение пористости горных пород;

# 1. Общая характеристика нейтронных методов

При облучении горных пород нейтронами эти частицы, лишенные электрических зарядов, свободно проникают сквозь электронные оболочки и взаимодействуют непосредственно с ядрами атомов. Взаимодействие нейтронов с ядром управляется ядерными силами, которые проявляются при каждом столкновении нейтрона с ядром. Действие ядерных сил может привести к рассеянию и поглощению нейтронов, причем поглощение сопровождается разнообразными ядерными реакциями. Исследуя рассеяние и поглощение нейтронов, можно идентифицировать химические элементы, на ядрах которых протекают эти процессы, что и используется в нейтронных методах каротажа.

Вероятность взаимодействия нейтронов с ядрами определенного сорта характеризуется полным нейтронным сечением σ, равным сумме сечений рассеяния σр и поглощения σп нейтронов:

σ (Е) = σр (Е) + σп (Е) (1)

Полное сечение а измеряется в барнах и представляет собой эффективную площадь ядра, которая обычно больше его геометрического сечения. Для быстрых нейтронов, например, σ ≈ 2πr2, где r - радиус ядра, зависимость сечений от энергии Е нейтронов может быть очень сложной. Кроме того, сечения зависят и от сорта ядер. При данной энергии для одних ядер преобладает рассеяние, а для других - поглощение нейтронов.

Основным процессом взаимодействия быстрых нейтронов (с Е>0,1 МэВ) с ядрами является рассеяние, которое может быть упругим и неупругим. При неупругом рассеянии нейтрон может возбудить ядро. Это возбуждение снимается путем испускания γ-излучения. Ядерная реакция неупругого рассеяния записывается в виде (n, n', γ). При рассеянии нейтроны теряют энергию, т.е. замедляются. Когда энергия нейтронов станет меньше 0,1 МэВ, неупругое рассеяние практически прекращается, и дальнейшее замедление нейтронов происходит путем упругих столкновений.

Сечение поглощения увеличивается с уменьшением энергии нейтронов. Это легко понять, если учесть, что медленный нейтрон может сравнительно долго находиться вблизи ядра. Поэтому возрастает вероятность захвата нейтрона ядром под действием ядерных сил.

Реакция радиационного захвата (n, γ) наиболее типична для полностью замедлившихся нейтронов. Энергия их соизмерима с энергией теплового движения атомов и молекул. Такие нейтроны называют тепловыми. Средняя энергия тепловых нейтронов при температуре 20°С составляет 0,025 эВ. Тепловые нейтроны вызывают реакцию (n, γ) на ядрах всех элементов, за исключением гелия.

В надтепловой области, т.е. в диапазоне энергий от долей и до нескольких сотен электронвольт, сечения поглощения для ряда элементов характеризуются наличием резонансов. Это означает резкое увеличение вероятности реакции (n, γ) для нейтронов с энергией, совпадающей с максимумами на кривой σп (Е). Такие нейтроны называют резонансными.

Величины σр и σп в формуле (1) относятся к единичному ядру, поэтому их часто называют микроскопическими сечениями. На практике обычно пользуются макроскопическими нейтронными сечениями Σ, которые измеряются в сантиметрах в минус первой степени и учитывают общее количество N атрмов данного сорта в кубическом сантиметре вещества:

Σр (п) (E) = σр (п) (Е) N (2)

Соответственно полное макроскопическое сечение будет равно

Σ (Е) = Σ p (E) + Σ п (Е) (3)

Полное макроскопическое сечение горной породы легко вычислить, если известен ее химический состав:

Σ (Е) = Σi σi (Е) Ni, (4)

где σi (E) - полное макроскопическое сечение для ядер i-copта; Ni - количество i-ядер в 1 см3, причем суммирование ведется по всем химическим элементам и их изотопам.

Необходимо отметить, что нейтронные сечения, в особенности сечение поглощения, для разных элементов периодической таблицы варьируют в широких пределах. Поэтому некоторые элементы, даже при ничтожном содержании их в породе, могут вносить в Σ значительный вклад. К элементам с аномально большими сечениями поглощения относятся ртуть, бор, кадмий и многие редкие земли.

Выше уже говорилось, что при облучении горной породы потоком быстрых нейтронов потери энергии при рассеянии приводят к замедлению нейтронов. Для большинства горных пород длина замедления в основном зависит от содержания водорода.

# 2. Схема нейтронных методов

Взаимное расположение в скважинном приборе источника нейтронов и детекторов, используемых в нейтронных методах каротажа, показано на рис.1. Измерения в нейтронных методах обычно производят в геометрии 4π, и нейтронное облако вокруг скважины и вызываемыеим гамма-поля обладают осевой симметрией. Пунктирные траектории нейтронов, иллюстрирующие процессы взаимодействия и ядерные реакции, идущие на быстрых и медленных нейтронах, показаны на рисунке условно.



Рис.1. Схема взаимодействия нейтронов с веществом и ядерных реакций, используемых в нейтронных методах каротажа.

При осуществлении какого-либо конкретного метода в скважинном приборе обычно применяются не разнотипные детекторы γ-квантов (2а, 2г) или нейтронов (26, 2в), а один или несколько однотипных детекторов, рассчитанных на регистрацию только одного вида излучения.

В большинстве нейтронных методов каротажа используются радиоизотопные полониево-бериллиевые источники, испускающие быстрые нейтроны с энергией ~4 МэВ. Между детекторами 2и источником 10располагается экран 11 из парафина и свинца, защищающий детектор от воздействия прямого нейтронного и γ-излучения источника.

В зависимости от регистрируемого детектором излучения нейтронные методы каротажа можно подразделить на собственно нейтронные методы, в которых измеряется плотность потока нейтронов в горных породах, и нейтрон-гамма-методы, основанные на регистрации вторичного γ-излучения. К изучаемой нами группе принадлежит нейтрон-нейтронный каротаж по тепловым (ННК-Т) и надтепловым (ННК-НТ), в том числе и резонансным (ННК-Р), нейтронам.

# 3. Определение влажности грунтов и почв

Типичными приложениями ННК являются определения влажности горных пород и содержания в них элементов с аномально большими сечениями поглощения нейтронов. Определение влажности W, которая непосредственно связана с пористостью, позволяет с помощью ННК дифференцировать осадочные горные породы по диалогическим признакам, оценивать прочностные качества пород и, что особенно важно, изучать свойства пластов как коллекторов нефти и газа.

Изменение показаний ННК с увеличением влажности связано с различным геометрическим расположением облака замедлившихся и рассеянных нейтронов относительно детектора. При малой влажности в связи с небольшим содержанием в горной породе водорода, служащего наиболее эффективным рассеивателем нейтронов, средняя длина пробега их в среде велика, и нейтронное облако формируется на значительном удалении от детектора, которого достигает лишь небольшое число нейтронов. С увеличением водородосодержания благодаря уменьшению длины пробега λ, нейтронное облако постепенно приближается к детектору, чем и вызвано появление максимума на кривой IННК (w). При большой влажности облако нейтронов снова удаляется от детектора, теперь уже приближаясь к источнику, и показания ННК уменьшаются.

Инверсия зависимости данных ННК от влажности характерна как для надтепловых, так и для тепловых нейтронов, поскольку плотности их в среде взаимосвязаны. На плотность тепловых нейтронов сильнее влияют вещественный состав пород и минерализация пластовых вод. Однако чувствительность ННК-Т выше, чем ННК-НТ. Поэтому определения влажности и пористости пластов с пресной водой ведут по ННК-Т, а пластов с минерализованной водой - по ННК-НТ.

Для перехода от ННК-Т к ННК-НТ достаточно окружить детектор нейтронов кадмиевым экраном, который полностью поглощает тепловые нейтроны. Надтепловые же нейтроны замедляются в этом экране до тепловых и регистрируются детектором.

Для измерения влажности используют ампульные источники нейтронов нескольких типов: Ро - Be, Pu - Be. В качестве детекторов в нейтронных влагомерах чаще всего используют пропорциональные борные счетчики, реже - сцинтилляционные счетчики медленных нейтронов.

Качество нейтронного влагомера определяется следующими показателями, связанными с эталонировочным графиком: высокой скоростью счета, низким фоном в точке m = 0, линейным характером графика в широком диапазоне влажности.

Промышленные образцы нейтронных влагомеров обычно работают по ННМ-Т. Отказ от использования надтепловых нейтронов объясняют потерей в скорости счета из-за низкой эффективности детекторов.

**Влияние вещественного состава и плотности.** Рассмотрим применение нейтрон-нейтронного каротажа для определения элементов с большим сечением поглощения нейтронов. В данном случае для уменьшения влияния водородосодержания выгодно применять инверсионные зонды.

В почвогрунтах могут присутствовать следующие элементы с высокими сечениями захвата - бор, хлор, марганец, железо, калий. Увеличение концентрации поглощающих элементов приводит к снижению скорости счета тепловых нейтронов и к погрешности в определении m.

Характерным примером элементов с большим σпслужит бор, поглощающий нейтроны по реакции (n, а).Одной из проблем, которую приходится решать при разведке месторождений боратов, является определение больших содержаний бора. Сечение поглощения нейтронов бором, а следовательно, и чувствительность нейтронной борометрии настолько велики, что ННК-Т практически не позволяет различать содержания бора выше 1,5 %. Поэтому большие содержания В определяются с помощью ННК-НТ. Сечение реакции σ (n, α) убывает с увеличением энергии нейтронов как 1/*v*, и градуировочный график ННК-НТ линеен в существенно большем диапазоне содержаний В, чем график ННК-Т.

**Плотность грунта.** Нейтронное поле зависит от плотности среды так же, как γ-поле. В частности, скорость счета, измеренная доинверсионным зондом, растет с увеличением плотности. При изучении влажности грунтов в условиях неполного влагонасыщения результаты измерений будут зависеть от плотности скелета грунта.

Если погрешность измерения влажности принять равной ∆m = 0,005, то допустимые колебания плотности скелета грунта составят ∆ρc = 0,02-0,05 г/см3. При значительных колебаниях плотности грунта в измерения влажности следует вносить поправку. Целесообразно сочетать измерения влажности ННМ с измерениями плотности ГГМ-П.

**Глубинность исследований.** Под глубинностью исследований ННМ обычно понимают радиус r0,9 цилиндрического слоя, из которого поступает к детектору 90% нейтронов. Установлены следующие закономерности.

Глубинность связана с длиной замедления нейтронов. Для зондов небольшой длины (R = 0-25 см)

r0,9 = 2,1 L, (5)

где L - длина замедления. С увеличением длины зонда глубинность меняется незначительно. Анализ пространственного распределения надтепловых нейтронов показывает, что максимальное число нейтронов находится в сферическом слое, удаленном от источника на расстояние около 2 ρL.

Поскольку и длина замедления, и длина диффузии существенно уменьшаются с ростом влажности, глубинность ННМ определяется главным образом влажностью среды. Кроме того, глубинность, выраженная в линейных единицах, уменьшается пропорционально росту плотности среды.

**Влияние промежуточной зоны.** Обычно измерения влажности грунтов выполняют в обсаженных скважинах малого диаметра. В этом случае на результаты измерений будут влиять диаметр обсадной трубы, характер заполнения скважины (вода, воздух), толщина и материал обсадной трубы, каверны в затрубном пространстве и их заполнение. При поверхностных измерениях влияют неровности исследуемого участка.

Для ННМ решающее значение имеет различие не столько плотностей, сколько нейтронных параметров промежуточной зоны и основной среды. Увеличение водородсодержания или концентрации поглощающих нейтроны элементов в промежуточной зоне резко изменяет скорость счета и характер эталонировочного графика. При увеличении диаметра заполненной воздухом скважины чувствительность нейтронного влагомера уменьшается. Заполнение скважины водой значительно увеличивает эффект. Обсадные дюралюминиевые трубы практически не влияют на скорость счета.

# 4. Изучение пористости горных пород

Принципиальная возможность определения пористости пород с помощью ННМ основана на изменении водородсодержания вследствие уменьшения или увеличения количества заполняющих поры водородсодержащих жидкостей (воды, нефти) или газа (углеводорода). Подчиненный эффект вызывается изменением плотности породы.

Применение ННМ для определения коэффициентов пористости и газонасыщенности на нефтяных и газовых месторождениях имеет свои особенности. Используют только каротажный вариант метода (ННК-Т и ННК-НТ).

Каротаж выполняют заинверсионными зондами длиной до 10-80 см в скважинах большого диаметра (150-300 мм), заполненных буровым раствором.



Рис.2. Связь между нейтронным полем и коэффициентом пористости

Если поры горной породы насыщены водой, коэффициент пористости равен объемной влажности (kn = m). С увеличением пористости растет водородсодержание и уменьшается плотность. Для заинверсионного зонда увеличение влажности вызывает уменьшение потока нейтронов, а уменьшение плотности, наоборот, приводит к росту потока. Определяющим является влияние влажности, поэтому нейтронное поле затухает.

Как расчеты, так и многочисленные эксперименты показывают, что в ограниченном диапазоне kп наблюдается линейная зависимость между потоком нейтронов и логарифмом коэффициента пористости:

N = a + b ln kп, (6)

где а и b - постоянные коэффициенты. Линейность нарушается в области малых значений пористости (kп < 0,05-0,1) вследствие влияния области инверсии (даже для зондов большой длины) и в области высоких пористостей (kп > 0,4-0,5).



Рис.3. Зависимость поля тепловых нейтронов от пористости песчаников (аппаратура ДРСТ-1, зонд R = 50 см, Ро - Ве-источник): 1 - диаметр скважины dc = 22,5 см; 2 - dc = 25 см; 3 - dc = 22,5 см, обсадка d0 = 16 см; 4 - dc = 25 см; d0 = 16 см

В качестве примера на рис.3 показаны эталонировочные зависимости ННК-Т для песчаников.

**Влияние параметров пласта.** Нейтронное поле зависит не только от влажности (пористости), но и от вещественного состава породы, минералогической плотности ρ0, характера и свойств заполнителя пор. Нефтяные и газовые месторождения связаны с двумя основными типами разрезов - карбонатным, в котором коллекторами являются известняки, и терригенным (пористые песчаники, иногда песчано-глинистые отложения). Песчаники, известняки и доломиты существенно различаются по нейтронным свойствам. При определении пористости эти различия приходится учитывать.

На определение пористости существенно влияет связанная вода таких пород, как глины, ангидрид. Для вычисления истинного значения коэффициента пористости необходимо вносить поправку на глинистость.

На нефтяных месторождениях поровое пространство коллекторов обычно заполнено водой или нефтью. По замедляющим свойствам пресная вода и нефть практически не различаются, так как они имеют одинаковое содержание водорода.

Повышенная минерализация пластовых вод не влияет на результаты ННК-НТ, но искажает коэффициент пористости. Этот эффект можно использовать для определения характера заполняющей поры жидкости с помощью ННК-Т.

**Аппаратура.** В СССР для определения пористости методом ННК использовалось два типа серийной каротажной аппаратуры - НГГК-62 и ДРСТ-1 (ДРСТ-3).

Аппаратура типа НГГК-62 - двухканальная па газоразрядных счетчиках. Для регистрации тепловых нейтронов счетчик окружают слоем кадмия толщиной 0,5 мм, а при регистрации надтепловых нейтронов - слоем парафина и кадмия. Зонд симметричного типа без прижимного устройства имеет длину 50 или 60 см. В качестве источника используется Ро - Ве-источник мощностью (2-6) 106 нейтр./с.

В двухканальной аппаратуре типа ДРСТ-1 для регистрации тепловых и надтепловых нейтронов используют сцинтилляционные детекторы. Рекомендуемые длины зондов-50-60 см. Мощность источника нейтронов (2-4) 106 нейтр./с.

В зондах ННК пространство между источником и детектором занято поглощающим нейтроны и γ-кванты экраном. Обычно используют свинцовые либо комбинированные (свинец + железо) экраны. Внешний диаметр зондового устройства равен 85-110 мм.

# 5. Анализ на нейтронопоглощающие элементы

Использование ННМ для анализа на элементы с высокими сечениями захвата медленных нейтронов (редкоземельные элементы, бор и др.) относится к числу первых исследований в области ядерной геофизики. К настоящему времени наиболее полно разработаны вопросы анализа на бор. Кроме того, ННМ применяют для изучения руд марганца, редкоземельных элементов, ртути, лития и др.

Поле тепловых и надтепловых нейтронов затухает в доинверсионной и заинверсионной областях при увеличении концентрации в среде нейтронопоглощающих элементов. Рассмотрим более подробно некоторые закономерности.

**Влияние энергии регистрируемых нейтронов.** Сечение захвата уменьшается с ростом энергии нейтрона, и соответственно уменьшается чувствительность нейтронного поля к содержанию нейтронопоглощающего элемента.



Рис.4. Зависимость потока нейтронов с энергией Еп от концентрации бора (Ео = 2,45 МэВ)

На рис.4 показана зависимость потока нейтронов от концентрации бора при различной энергии регистрируемых нейтронов. В тепловой области чувствительность максимальная при малых концентрациях бора; при увеличении содержания бора чувствительность уменьшается.

По мере увеличения энергии нейтронов уменьшается чувствительность к бору, но концентрационное вырождение наблюдается при более высоком содержании бора.

**Влияние влажности.** В нейтронопоглощающей среде наблюдается инверсия поля при увеличении влажности и плотности. Инверсионная область сдвигается в сторону больших зондов при переходе к меньшим энергиям. Для одной и той же энергии нейтронов с увеличением концентрации нейтронопоглощающих элементов происходит расплывание зоны инверсии со сдвигом в сторону больших зондов. При уменьшении водородсодержания наблюдается возрастание чувствительности нейтронного ноля к поглощающим элементам.

**Влияние длины зонда.** При увеличении расстояния от источника до детектора (и соответственно толщины поглощающе-рассеивающей среды) происходят такие же изменения нейтронного поля, как при уменьшении энергии нейтронов. Это объясняется смягчением спектра нейтронов по мере удаления от источника.

**Влияние заполнения скважины.** Замена в скважине воздуха на воду или буровой раствор существенно уменьшает чувствительность ННК к содержанию нейтронопоглощающих элементов. Эта закономерность проявляется как в доинверсионной, так и в заинверсиошюй области. Заполнение скважины водой вызывает также смещение зоны инверсии в сторону меньшей длины зондов (по сравнению с сухой скважиной или однородной средой).

**Методика и техника ННК.** Для ННК на нейтронопоглощающие элементы обычно используют Ро-Ве-источники нейтронов и сцинтилляционпые детекторы тепловых нейтронов. Разделительный экран между источником и детектором изготавливают из свинца, железа, парафина с бором.

**1. Изучение руд бора.** ННК успешно применяют на месторождениях бора для выделения руд в разрезе. Основные помехи - кавернозность стенок скважин и переменный диаметр. Количественные оценки содержания бора встречают значительные трудности, связанные как с помехами, так и с концентрационным вырождением эталонировочного графика в области большого содержания. Задача до конца не решена, но экспериментально оценена возможность количественного каротажа.

Следует отметить, что для анализа руд бора при содержании В2O3 свыше 0,3 г/см3 целесообразно переходить к регистрации нейтронов более высоких энергий 1-100 эВ.

**2. Руды редкоземельных элементов.** Для редких земель (основной поглощающий элемент - гадолиний) характерны большое сечение поглощения тепловых нейтронов и сравнительно небольшое (такое же, как для пород) сечение поглощения надтепловых нейтронов. При таком условии ННК-НТ характеризует главным образом изменение водородсодержания, а сравнение ННК-Тс ННК-НТ дает возможность учесть переменную влажность при выделении поглощающих элементов.

**3. Руды ртути.** Имеются благоприятные предпосылки использования ННК-Т для изучения руд ртути. Симметричный 4π-зонд ННК-Т длиной 31 см обеспечивает хорошую чувствительность и дифференциацию по содержанию ртути в широком диапазоне концентрации (0-10%).

Существенные затруднения возникают при изучении комплексных руд ртути, содержащих сурьму, так как последняя имеет повышенное сечение захвата тепловых нейтронов (σс = 5,5 б). Для анализа ртутно-сурьмяных руд успешно сочетали ННК-Т и ГГК-С с одновременным определением двух элементов.

**4. Другие элементы.** Перспективы применения ННК-Т имеются при изучении руд лития и марганца. При изучении руд лития возникают проблемы, аналогичные бору.

На месторождениях марганца ННК-Т применяют для выделения руд в разрезах скважин. Метод ННК-Т мало пригоден для количественного определения содержаний марганца, так как переменное водородсодержание является серьезной помехой.

# Заключение

В данной работе рассматривался нейтрон-нейтронный метод радиометрической разведки, который заключается в исследовании интенсивности вторичного излучения, возникающего при облучении нейтронами горных пород.

Типичными приложениями ННМ являются определения влажности, пористости горных пород и содержания в них элементов с аномально большими сечениями поглощения нейтронов. Определение влажности W, позволяет с помощью ННК дифференцировать осадочные горные породы по диалогическим признакам, оценивать прочностные качества пород и изучать свойства пластов как коллекторов нефти и газа.

Принципиальная возможность определения пористости пород с помощью ННМ основана на изменении водородсодержания вследствие уменьшения или увеличения количества заполняющих поры водородсодержащих жидкостей (воды, нефти) или газа (углеводорода).

Использование ННМ для анализа на элементы с высокими сечениями захвата медленных нейтронов (редкоземельные элементы, бор и др.) относится к числу первых исследований в области ядерной геофизики. К настоящему времени наиболее полно разработаны вопросы анализа на бор. Для ННК на нейтронопоглощающие элементы обычно используют Ро-Ве-источники нейтронов и сцинтилляционные детекторы тепловых нейтронов.

# Список литературы

1. Мейер, Владимир Александрович. "Основы ядерной геофизики": учебное пособие / 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1985.
2. Арцыбашев, Владимир Александрович. "Ядерно-геофизическая разведка": учебное пособие / 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Атомиздат, 1980.
3. Филиппов, Е.М. "Нейтрон-нейтронный и нейтронный гамма-методы в рудной геофизике": Новосибирск - Наука, 1972г.