

Специальность 6В07201 – «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых»
Дисциплина «Радиоактивные методы исследования»

Лекция

Физические основы импульсных нейтронных методов

Лектор: Пак Ю.Н.
д.т.н., проф. каф. ГРМПИ



План лекции:

1. Физические основы.
2. Параметры нестационарного нейтронного поля
3. Применение ИННК
4. Основы импульсного нейтронного гамма метода
5. Особенности импульсного нейтронного гамма-метода неупругого рассеяния быстрых нейтронов

Физические основы

В ранее рассмотренных нейтронных методах исследовалось пространственно-энергетическое распределение нейтронов и гамма-квантов, возникающих при бомбардировке среды нейтронами от стационарного (непрерывно испускающего) источника.

Непрерывный режим облучения и измерения не позволяет получить информацию о распределении вторичного излучения во времени, что затрудняет возможность отдельного изучения эффектов взаимодействия нейтронов. Это снижает информативность стационарных нейтронных методов.

От этого недостатка свободны импульсные нейтронные методы, основанные на исследовании нестационарных нейтронных и гамма-полей, создаваемых импульсными источниками нейтронов.

Впервые идея импульсного нейтронного метода высказана в 1956г. Г.Н. Флеровым.

Сущность импульсного нейтронного метода заключается в облучении горной породы кратковременными потоками нейтронов длительностью ΔT , следующими друг за другом через определенный промежуток времени T , и в измерении плотности нейтронов или гамма-квантов в заданные элементы времени Δt , расположенные в пределах указанного времени T , называемого периодом.

Последовательно изменяя время включения детектора t после окончания очередного импульса быстрых нейтронов (время задержки), можно исследовать зависимость плотности исследуемых частиц от времени.

Регистрируя плотность излучения на протяжении времени Δt при фиксированных значениях времени задержки, можно получить более избирательную информацию о процессах взаимодействия нейтронов с веществом, характерные для указанного времени жизни нейтронов.

Рисунок 1 – Общая схема импульсного нейтронного метода

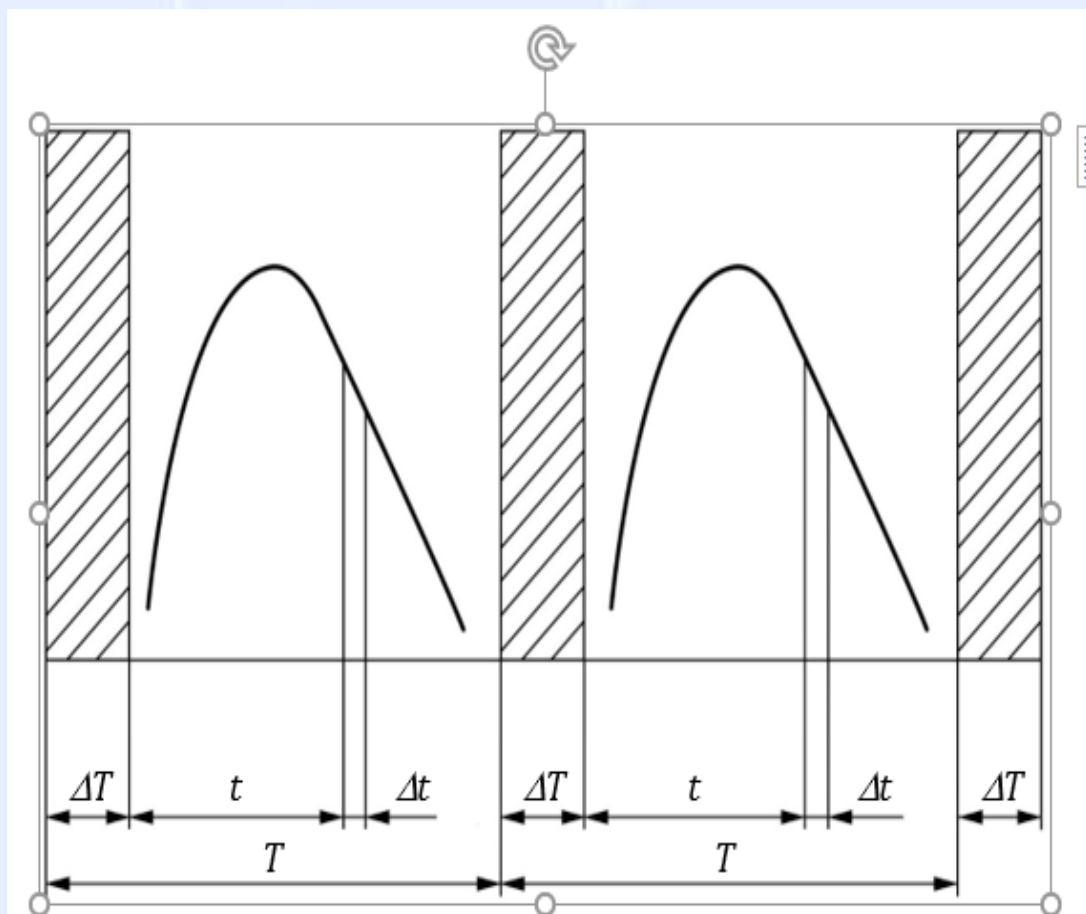


Рисунок 2 – Временное распределение основных процессов взаимодействия нейтронов с веществом

Начало нейтронного импульса	Замедление быстрых нейтронов		Диффузия и захват тепловых нейтронов
	Упругое и неупругое рассеяние	Упругое рассеяние, резонансный захват, термализация	
	Активация ядер		
Распад и излучение активированных ядер			
	10^{-8}	10^{-6}	$10^{-2} t, ^\circ\text{C}$

В зависимости от того, при каких временах задержки регистрируются импульсные вторичные поля излучения (нейтроны, гамма-кванты), различают следующие импульсные нейтронные методы:

Импульсный нейтрон-нейтронный метод (ИННМ);

Импульсный нейтронный гамма метод неупругого рассеяния быстрых нейтронов (ИНГМ-нр);

Импульсный нейтронный гамма-метод радиационного захвата тепловых нейтронов (ИНГМ-рз).

В первой модификации импульсного метода измеряют интенсивность тепловых нейтронов, во второй – интенсивность мгновенного γ -излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых нейтронов, в третьей модификации регистрируют гамма-излучение, сопровождающее радиационный захват тепловых нейтронов. В зависимости от модификации метода используются детекторы тепловых нейтронов или гамма-излучения.

При ИНМ регистрируют поток тепловых нейтронов во временном интервале Δt спустя время задержки после окончания очередного нейтронного импульса. Временной анализатор импульсов позволяет получить временной спектр тепловых нейтронов путем измерений при различных значениях времени задержки.

Таким образом, ИНМ в зависимости от решаемой задачи исследуется плотность потока тепловых нейтронов в определенном временном интервале, либо ее временной спектр.

При реализации ИНГМ вместо потока нейтронов измеряют интенсивность гамма-излучения. Наряду с измерением временного спектра возможен анализ энергетического спектра гамма-излучения с помощью энергетически-временного анализатора импульсов.

Существующие модификации ИНГМ (по неупругому рассеянию быстрых нейтронов и радиационному захвату тепловых нейтронов) реализуются при различных временных параметрах.

Неупругое рассеяние характерно только для быстрых нейтронов, а следовательно, оно происходит в начальные моменты времени.

Поэтому на практике в ИНГМ-нр поток гамма-квантов регистрируют во время импульса быстрых нейтронов (время задержки равно 0).

Частоту следования импульсов нейтронов T выбирают такой, чтобы к моменту регистрации очередного потока гамма-излучения неупругого рассеяния отсутствовало захватное гамма-излучение, обусловленное предыдущим импульсом нейтронов.

Таким образом, для преимущественной регистрации гамма-излучения неупругого рассеяния время задержки (время, прошедшее с момента отключения генератора до момента включения детектора) выбирают близким к нулю.

В ИНГМ-рз время задержки обычно выбирают после инверсионной области на спаде зависимости.

Параметры нестационарного нейтронного поля

В результате ядерной реакции нейтронный генератор испускает быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ. В процессе взаимодействия быстрые нейтроны замедляются за счет упругих и неупругих рассеяний с ядрами элементом, слагающих горную породу. Став тепловыми, они испытывают процесс диффузии, сопровождающийся поглощением тепловым нейтронов. Таким образом, все нейтроны от одного импульса прекращают свое существование в результате радиационного захвата.

Временное распределение тепловых нейтронов на некотором расстоянии R от источника будет иметь инверсионную от времени зависимость.

После окончания нейтронного импульса со временем поток тепловых нейтронов возрастает, достигает максимума.

Дальнейшее снижение потока тепловых нейтронов обусловлено диффузионным процессом с поглощением тепловых нейтронов за счет их радиационного захвата.

Темп спада зависимости числа тепловых нейтронов от времени зависит от нейтронно-поглощающих свойств среды – среднего времени жизни тепловых нейтронов τ .

Таким образом, важная особенность импульсного метода по сравнению со стационарным состоит в том, что можно отдельно оценить влияние нейтронных параметров среды и, в частности, влияние диффузионных параметров τ и D .

При больших временах задержки, поле тепловых нейтронов практически не зависит от длины замедления и определяется только временем жизни тепловых нейтронов и коэффициентом диффузии.

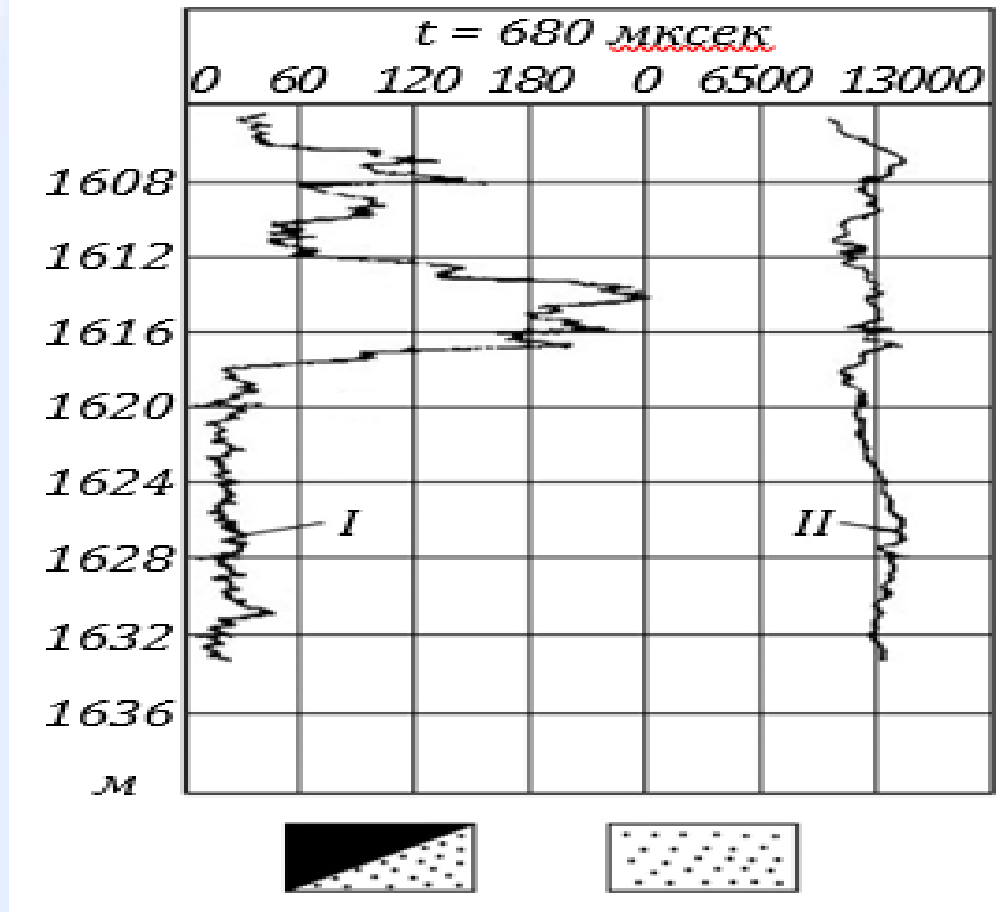
Время жизни тепловых нейтронов определяется поглощающими свойствами породы, а коэффициент диффузии – рассеивающими свойствами, зависящими от водородосодержания.

Раздельное определение τ и D позволяет оценивать как поглощающие, так и рассеивающие свойства породы по отношению к нейтронам. При достаточно больших значениях t плотность потока тепловых нейтронов будет зависеть лишь от времени жизни.

Следовательно, изменение нейтронного поля по времени при больших задержках дают информацию о способности горной породы поглощать тепловые нейтроны.

По углу наклона графика зависимости $n(t)$, построенного в полулогарифметических координатах, можно непосредственно определить время жизни тепловых нейтронов.

Пример отбивки ВНК по кривым ИННМ (I)
в сопоставлении с интегральной кривой ННМ-Т (II)



1 – песчаник нефтеносный; 2 – песчаник водоносный

В условиях высокой минерализации пластовых вод ИННК позволяет не только расчленять коллекторы по водонефтенасыщенности, но и осуществлять количественную оценку хлорсодержания. В водоносных породах по величине хлорсодержания возможно оценивать коэффициент пористости при выполнении условия постоянства минерализации пластовых вод в пределах исследуемого района.

Важную практическую значимость имеет возможность отбивки по данным ИННК газоводяного контакта. Газоносные коллекторы характеризуются по сравнению с водоносными большими значениями τ и отмечаются на кривых ИННК повышенными значениями плотности тепловых нейтронов. Наибольшее различие в значениях τ и измеренных интенсивностей тепловых нейтронов против газоносных и водоносных коллекторов наблюдается в породах с повышенной минерализацией пластовых вод. Причем, величина этого различия в таких условиях минерализации значительно больше, чем на водонефтяном контакте.

При исследованиях ИННК с целью выделения газоносных пластов необходимо учитывать, что объемное содержание газов в породах, а следовательно и величина t зависят от пластового давления и температуры. С увеличением этих параметров (с увеличением глубины залегания пластов) различие в значениях t пород, насыщенных газом и нефтью или неминерализованными водами, уменьшается.

Однозначность расчленения коллекторов по их поглощающим свойствам резко ухудшается при наличии зоны проникновения в них фильтрата бурового раствора. Эффективность решения указанных задач с помощью ИННК во многом зависит от методики измерений и, в частности от времени задержки t и длины зонда.

В общем случае с увеличением времени задержки снижается влияние скважинных условий и повышается чувствительность метода к изменению поглощающих свойств горных пород.

С этой точки зрения целесообразно выбирать как можно большие значения t . Однако при этом необходимо обеспечивать достаточную статистическую точность измерений.

Чем больше время задержки, тем меньше число зарегистрированных тепловых нейтронов, а следовательно и выше статистическая погрешность измерений. При использовании генераторов нейтронов с выходом около $n \cdot 10^7$ нейтр./сек время задержки t не должно превышать 1500-2000 мксек.

При выборе параметров зонда следует учитывать, что с его увеличением снижается искажающее влияние скважины и увеличивается дифференцирующая способность метода и, как следствие, повышается надежность в оценке параметров D и τ пласта.

При этом, как и в случае выбора оптимального времени задержки t , следует обеспечить требования необходимой статистической точности измерений.

Глубинность ИННК. Как и случае стационарного нейтрон-нейтронного метода за глубинность ИННК принимают радиус такого цилиндра, в котором плотность нейтронов на его оси не более чем на 10% меньше плотности в такой же по вещественному составу, но безграничной среде на том же расстоянии от источника.

Приближенное выражение для глубинности ИННК имеет вид:

$$R_{0,9} \approx 2,1\sqrt{L_3^2 + D(t - t_3)}.$$

Длина замедления нейтронов L_3 зависит от энергии первичных нейтронов. Поскольку в ИННК первичные нейтроны имеют энергию 14 МэВ, глубинность стационарного ННК ниже глубинности ИННК.

Глубинность возрастает с увеличением времени задержки t . В горной породе с повышенным содержанием водорода глубинность ИННК на 20% выше глубинности стационарного ННК. Приращение глубинности тем больше, чем выше коэффициент диффузии, зависящий преимущественно от водородосодержания.

Влияние скважинных условий

Нейтронно-замедляющие и нейтронно-поглощающие свойства среды, заполняющей скважину (τ_c и D_c) отличаются от нейтронных свойств исследуемой породы (τ_n и D_n). Возможны случаи сильного ($\tau_n < \tau_c$) и слабого ($\tau_n > \tau_c$) поглощения тепловых нейтронов в исследуемой породе.

При значительном поглощении нейтронов в породе нейтроны исчезают в нем быстрее, чем в скважине, и зарегистрировать нейтроны, несущие информацию о породе, труднее.

Более благоприятная ситуация в случае слабого поглощения ($\tau_n > \tau_c$), когда тепловые нейтроны в скважине исчезают быстро.

Если при этом соблюдается условие $D_n > D_c$, то поле тепловых нейтронов в скважине является быстрозатухающим не только во времени, но в пространстве.

Поэтому через определенное время задержки детектор будет в основном регистрировать диффундирующие из породы тепловые нейтроны, количество которых определяется преимущественно параметрами пласта τ и D_n .

Часто скважина заполнена водой или нефтью, у которых значения τ и D сравнительно малы. Выбором сравнительно больших значений времени задержки и длины зонда можно получить информацию о нейтронном поле, практически не зависящим от параметров скважины и определяемом в основном свойствами горной породы.

Отсюда в сравнении со стационарным нейтронным методом результаты ИННК значительно менее подвержены влиянию скважинных условий. Дифференциация показаний импульсного нейтрон-нейтронного каротажа при исследовании пород с различными нейтронными свойствами снижается с увеличением диаметра скважины.

Двухзондовый ИННМ.

Задачи, решаемые с помощью ИННК, связаны с выделением в разрезах скважин пластов, различающихся по нейтронно-поглощающим свойствам, в частности среднему времени жизни нейтронов. По значению времени жизни нейтронов выделяют нефте и водонасыщенные пласты.

В рудной геофизике интервалы с повышенной концентрацией элементов, обладающих большими сечениями захвата тепловых нейтронов, можно выделить по минимальным в сравнении с вмещающими породами значениями времени жизни тепловых нейтронов.

Значительная неоднородность разреза по пористости наблюдается в карбонатных отложениях нефтяных месторождений. Пористость может варьировать от 2 до 30%, что приводит к изменению τ в нефтеносных пластах в 1,5-2 раза, а в водонасыщенных минерализованной водой – в 3-4 раза.

На месторождениях твердых полезных ископаемых вариации содержания водорода, входящего в состав свободной (поровой) или химически связанной воды, также оказывают дестабилизирующее влияние на результаты ИННК.

Учет переменного водородосодержания может быть осуществлен применением ИННК в двухзондовой методике. Эта модификация согласно Р.А. Резванову получила название импульсный нейтрон-нейтронный каротаж с компенсацией влияния водородосодержания (ИННК – КВ).

Суть данной методики заключается в измерении отношения показаний при двух длинах зондов R_1 и R_2 при фиксированных временах задержки t_1 и t_2 .

Длины зондов и время задержки подбирают такими, чтобы при вариации водородосодержания в горной породе изменение пространственно-временного распределения плотности тепловых нейтронов будут компенсированы.

Величина измеренного отношения показаний двухзондового ИННК будет инвариантной от среднего коэффициента пористости в некотором диапазоне его изменения при определении соотношении длин зондов и времени задержки.

Оптимальные параметры находятся теоретически и путем измерений на моделях нефтенасыщенного и водоносного пластов.

Типичные значения оптимальных параметров для нефтяной скважины, пересекающей карбонатную породу переменной пористости составили: $R_1 = 40$ см; $t_1 = 1000$ мкс; $R_2 = 70$ см; $t_2 = 600$ мкс.

Применение ИННК

Метод позволяет проводить литологическое расчленение разрезов скважин. Дифференциация пород осуществляется по их основным нейтронным параметрам – коэффициенту диффузии и времени жизни тепловых нейтронов. Результаты ИННК более информативны в сравнении со стационарными нейтронными методами. Высокая эффективность ИННК достигнута при определении положения водо-нефтяного контакта. Нефть и пресная вода имеют близкие значения τ (соответственно 214 и 207 мкс при 14°C). В минерализованной воде (100 г/л NaCl) величина τ снижается до 100 мкс. Чем выше минерализация, тем больше чувствительность импульсного нейтронного метода к оценке ВНК.

Задача определения ВНК по данным ИННК успешно решается для терригенных отложений. В карбонатных отложениях эта задача осложняется ввиду значительной неоднородности разреза по пористости. Эти трудности решаются с помощью двухзондовой модификации ИННК.

С помощью ИННК можно оценивать пористость и нефтенасыщенность коллекторов. Коэффициент пористости K_{Π} и величину среднего времени жизни нейтронов в пласте ($\tau_{пл}$), скелете ($\tau_{ск}$) и насыщающем флюиде ($\tau_{фл}$) связаны соотношением:

$$\frac{1}{\tau_{пл}} = \frac{K_{\Pi}}{\tau_{фл}} + \frac{(1 - K_{\Pi})}{\tau_{ск}}. \quad (1)$$

Для нефтенасыщенной породы имеем:

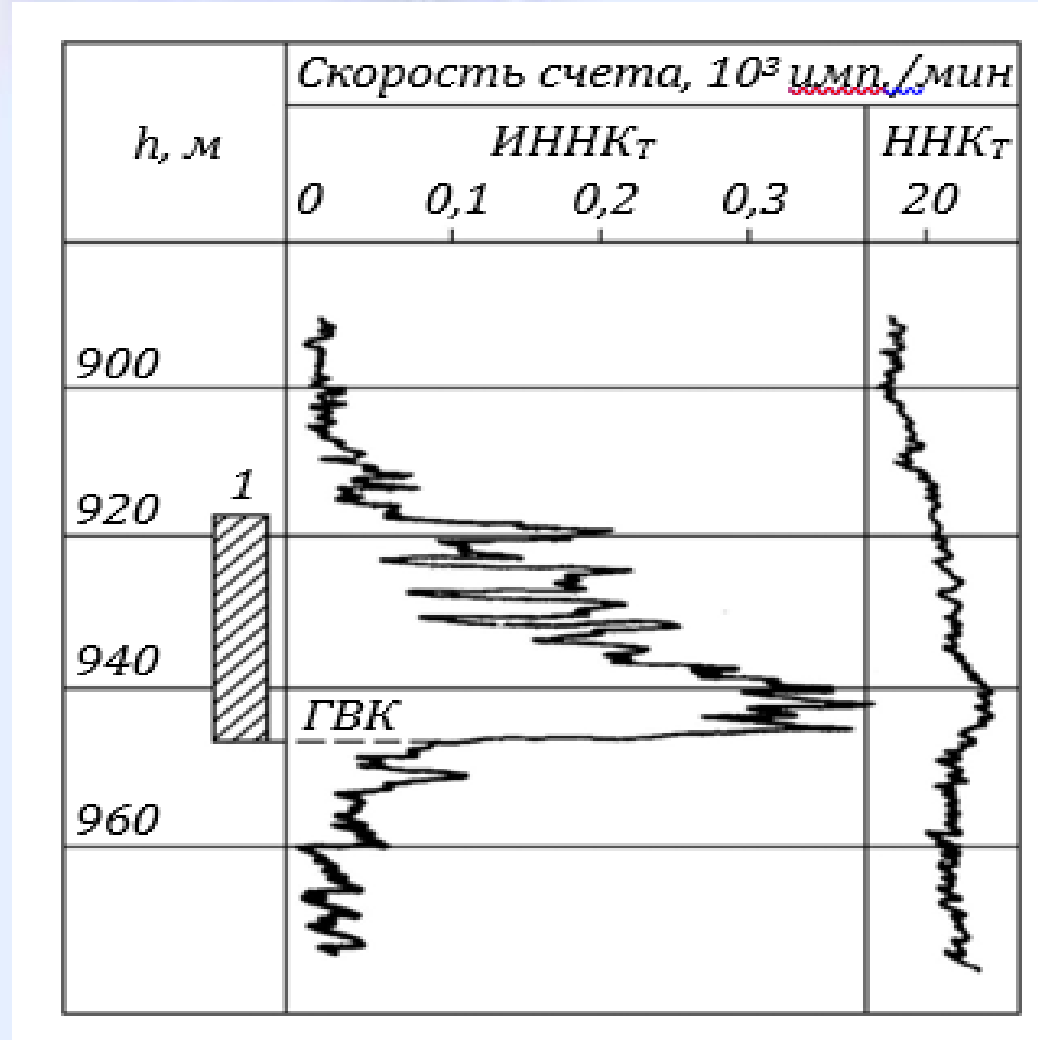
$$\frac{1}{\tau_{пл}} = \frac{(1 - K_{\Pi})}{\tau_{ск}} + \frac{K_{\Pi}(1 - K_{Н})}{\tau_{В}} + \frac{K_{\Pi} \cdot K_{Н}}{\tau_{Н}}, \quad (2)$$

где $K_{Н}$ – коэффициент нефтенасыщенности;

$\tau_{Н}$, $\tau_{В}$ – время жизни нейтронов в нефти и воде.

При исследовании коллекторов часть параметров, входящих в выражения (1) и (2) измеряется на моделях скважин.

Отбивка газоводяного контакта по данным ИННК



1 – газ в песчано-глинистых отложениях

Дифференцирующую способность ИННК применительно к выделению рудного элемента можно выразить следующим соотношением:

$$\frac{N}{N_0} = \exp \left[-t \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} \right) \right], \quad (3)$$

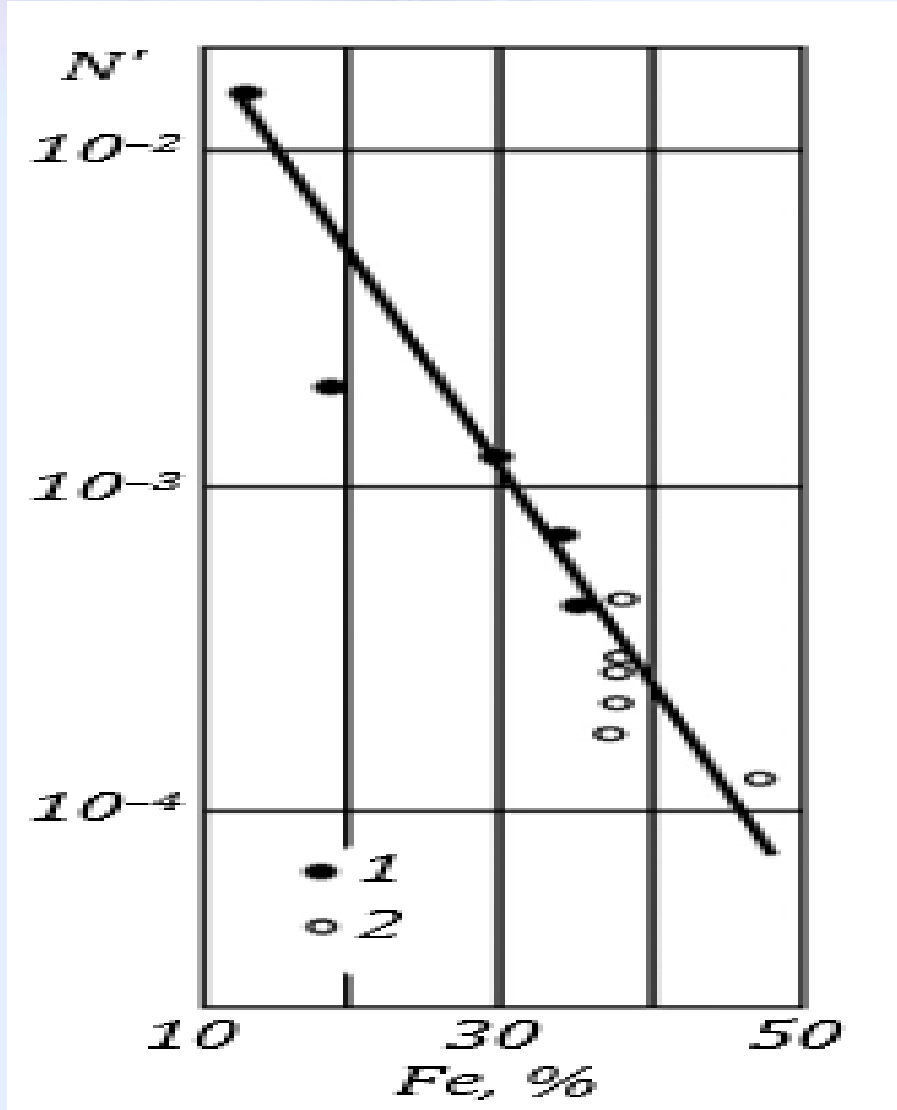
где N, N_0 – показания метода, соответственно от рудного минерала и вмещающей породы;

τ, τ_0 – время жизни теплового нейтрона, соответственно для рудного минерала и вмещающей породы.

Из формулы (5) следует, что чувствительность метода к рудному элементу зависит от времени задержки.

Импульсный нейтронный метод апробирован для определения железа в скважинах, заполненных пресной водой. Диаметр скважин 110-150 мм, длина зонда – 30 см, время задержки – 1000 мкс.

Зависимость показаний ИННК от содержания железа



Использован генератор нейтронов с выходом 10^7 нейтр/с. С возрастанием содержания железа показания метода снижаются. Достигнута высокая чувствительность метода к железу.

При изменении содержания железа на 10% показания меняются почти в 5 раз. Такая высокая контрастность недостижима ни для какого другого ядерно-геофизического метода.

Известны опытно-методические разработки по использованию ИННМ для определения марганца, ртути, кадмия, меди, редкоземельных элементов.

Дальнейшие перспективы применения ИННМ в геолого-геофизических исследованиях связываются с внедрением стабильных генераторов с большим выходом нейтронов, высокопрецизионной измерительной аппаратуры и современных методик учета дестабилизирующих факторов.

Основы импульсного нейтронного гамма метода

ИНГМ имеет две наиболее распространенные модификации: импульсный нейтронный гамма-метод радиационного захвата тепловых нейтронов (ИНГМ-рз) и импульсный нейтронный гамма-метод неупругого рассеяния быстрых нейтронов (ИНГМ-нр).

Импульсный НГМ-рз призван решать те же задачи, что и выше рассмотренный ИННМ. Это обусловлено тем, что захватное γ -излучение, регистрируемое в ИНГМ-рз, возникает в результате поглощения тепловых нейтронов. Поэтому закономерности, свойственные тепловым нейтронам, будут повторяться и для гамма-излучения, сопровождающего радиационный захват нейтронов.

По сравнению со стационарным НГМ, импульсный НГМ-рз обладает теми же преимуществами, что и ИННМ: более высокой чувствительностью, лучшей дифференциацией, значительной глубиной, принципиальной возможностью определения времени жизни тепловых нейтронов.

Пространственно-временное распределение гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов может отличаться от характеристик порождающего его плотности тепловых нейтронов. Это вызвано тем, что γ -излучение распространяется в породе практически мгновенно. В некоторых точках пространства появление гамма-квантов будет опережать появление тепловых нейтронов.

Поле захватного гамма-излучения более однородно в пространстве, его однородный характер устанавливается быстрее, чем в случае поля тепловых нейтронов. В этой связи нестационарное гамма-поле в ИНГМ-рз изменяется по закону $\exp(-t/\tau)$ при меньших задержках времени, чем поле нейтронов в ИННМ. Поэтому в ИНГМ можно использовать меньшие задержки, тем самым увеличивается скорость счета во временных окнах и снижается статистическая погрешность измерений. Кроме того с увеличением размера зонда поток γ -излучения убывает медленнее, чем поток тепловых нейтронов. Все это создает дополнительные преимущества ИНГМ.

Принципиальная особенность импульсного нейтронного гамма-метода состоит в возможности разделительной регистрации гамма-излучения радиационного захвата тепловых нейтронов и гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов.

Такая возможность обеспечивается импульсным режимом измерений, позволяющим разграничить процессы замедления быстрых нейтронов и диффузии тепловых нейтронов.

Импульсный НГМ-рз, способный селективно выделять определенные элементы по энергетическим спектрам γ -излучения радиационного захвата, имеет много общего со стационарным НГМ. Отличительная особенность ИНГМ от НГК состоит в возможности исследования не только интенсивности γ -излучения и его энергетического состава, но и временного распределения.

При реализации ИНГМ возникает проблема учета гамма-фона, обусловленного естественной радиоактивностью горных пород, наведенной нейтронами искусственной радиоактивностью, которая измеряется в НАМ и мгновенным γ -излучением, возникающим при неупругом рассеянии быстрых нейтронов. Влияние последнего устраняется соответствующим выбором времени задержки.

Фон за счет естественной и наведенной радиоактивности остается неизменным во временном интервале между очередными импульсами нейтронов и его влияние будет ощутимым при больших временах задержки, когда полезный сигнал (скорость счета импульсов ИНГМ) незначителен.

Выбором оптимальной частоты и ширины временного интервала Δt при достаточно большом выходе нейтронов можно заметно уменьшить величину гамма-фона. Используя спектрометрическую аппаратуру, можно также снизить влияние естественного и наведенного γ -излучения.

Достоинство ИНГК по сравнению с ИННК заключается в меньшем влиянии скважинных условий на результаты импульсного НГК.

Интересной представляется методика ИНГК, заключающаяся в измерении показаний N_1 и N_2 в определенных временных окнах, выбранных при двух временах задержки t_1 и t_2 в области затухания нейтронного поля, и определении макроскопического сечения радиационного захвата тепловых нейтронов Σ .

$$\Sigma = \frac{\ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{v \cdot (t_2 - t_1)}.$$

Глубинность ИНГК зависит от тех же факторов, что и глубинность ИННК. Отличие лишь в том, что при одинаковых условиях глубинность импульсного НГК примерно на 10% превышает глубинность импульсного НК.

Особенности импульсного нейтронного гамма-метода неупругого рассеяния быстрых нейтронов

Суть метода заключается в регистрации гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах элементов горной породы. Неупругое рассеяние – это пороговая реакция, происходящая при энергии нейтронов, превышающей порог неупругого рассеяния. В процессе замедления быстрых нейтронов вероятность неупругого рассеяния исчезает.

Поэтому временное окно Δt для регистрации гамма-излучения неупругого рассеяния должно практически совпадать с длительностью нейтронного импульса.

Для исключения вклада гамма-излучения радиационного захвата длительность импульса не должна превышать величины среднего времени замедления нейтронов в исследуемой среде. Обычно длительность импульсов от нейтронного генератора выбирают равной несколько микросекунд.

Важным моментом при практической реализации ИНГМ-рз является выбор оптимальных временных параметров. Период следования импульсов выбирают таким, чтобы к моменту включения детектора гамма-квантов захватное гамма-излучение от предыдущего нейтронного импульса уже исчезло.

В общей шкале времени жизни нейтронов процесс неупругого рассеяния занимает ограниченный промежуток времени, приуроченный к ее началу. Поэтому возможности исследований временного распределения поля гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов ограничены. На практике исследуется лишь пространственное распределение.

В настоящее время ИНГК-нр применяется для определения по разрезу скважин концентраций ряда элементов: С, О, Si и Са. При неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах указанных элементов возникают гамма-кванты с энергией С – 4,43 МэВ; О – 6,13 МэВ; Si – 1,78 МэВ; Са – 3,4 МэВ.

Если в пределах временного окна Δt осуществляется сортировка импульсов от гамма-квантов по амплитуде, то можно отдельно регистрировать гамма-излучение от С, О, Si и Са. Энергетические окна выбирают в области аналитических линий указанных элементов: $\Delta E(\text{C})=3,8-4,7$ МэВ; $\Delta E(\text{O})=4,9-6,6$ МэВ; $\Delta E(\text{Si})=1,5-2,0$ МэВ; $\Delta E(\text{Ca})=2,6-3,6$ МэВ. Для этого используется многоканальный амплитудный анализатор.

Электронно-регистрирующая аппаратура ИНГК-нр содержит блок управления, обеспечивающий синхронизацию работы импульсного генератора нейтронов и блок детектирования. Последний содержит непосредственно детектор гамма-квантов, временной селектор импульсов и многоканальный амплитудный анализатор.

Временной селектор выделяет импульсы от детектора, регистрируемые на протяжении временного интервала Δt . Импульсы сортируются по энергии в блоке амплитудного анализа. Вычислительный блок аппаратуры осуществляет операции по расчету концентраций С, О, Si и Са в исследуемой породе.

Импульсный НГК-нр применяется на нефтегазовых месторождениях для оценки водо-нефтенасыщенности. Индикатором служит отношение C/O. Метод получил название углеродно-кислородный каротаж. Отличительная особенность ИНГК-нр по отношению C/O заключается в независимости результатов от минерализации пластовых вод.

Это обстоятельство выгодно отличает импульсный НГК-нр от импульсных нейтронных методов, основанных на измерении времени жизни тепловых нейтронов в горных породах различной пористости и насыщенности.

Отношение Si/Ca характеризует тип коллектора. Малые значения характерны для карбонатных пород, а большие – для песчаных.

С помощью аппаратуры ИНГК-нр фирмы «Тексано» (США), включающей нейтронный генератор мощностью $2 \cdot 10^8$ нейтр/с, на каротажных диаграммах записывались содержания элементов и их отношения C/O и Si/Ca со статистической погрешностью не превышающей 1% при измерении C/O.

Достоверность определения водонефтяного контакта в процессе геофизических исследований скважин можно обеспечить за счет исключения дестабилизирующего действия непостоянства пористости пород различной литологии и скважинных условий измерений. Известный углеродно-кислородный каротаж по неупругому рассеянию быстрых нейтронов с измерением соотношения C/O частично решает проблему учета литологии пластов.

Измеряемые в ИНГК-нр отношения интенсивностей C/O и Ca/Si дают количественную информацию о соотношении указанных элементов в зоне действия импульсного нейтронного гамма-метода (~ 20 см), однако, они не учитывают в достаточной мере дестабилизирующее влияние переменной пористости пород, литологии пластов и скважинных условий.

Импульсный нейтронный гамма-метод в варианте C/O каротажа усовершенствован измерением времени жизни тепловых нейтронов и нормированием всех текущих параметров к показаниям опорного пласта.

Дифференцированное нормирование текущего времени жизни тепловых нейтронов к опорному по величине $f_i = (\tau_i - \tau_{оп})/\tau_{оп}$, позволяет учесть нейтронно-поглощающие свойства среды в сравнении с опорным водонасыщенным пластом.

Величина отношения N_c/N_o характеризует насыщенность пласта соответствующим флюидом (вода, нефть), а отношение N_{Ca}/N_{Si} несет информацию о литологической принадлежности пласта (песчаник, известняк). Дифференцированное нормирование измеренных отношений по величине

$$\Psi_i = \frac{\left(\frac{N_c}{N_o} \Big/ \frac{N_{Ca}}{N_{Si}} \right)_i - \left(\frac{N_c}{N_o} \Big/ \frac{N_{Ca}}{N_{Si}} \right)_{on.}}{\left(\frac{N_c}{N_o} \Big/ \frac{N_{Ca}}{N_{Si}} \right)_{on.}}$$

на показания опорного пласта делают результаты способа инвариантными к переменной пористости и скважинным условиям измерений, что повышает достоверность определения водонефтяного контакта по данным измеренных текущих значений величин.

На основе обработки и комплексной интерпретации результатов исследований большого числа скважин и пластопересечений с известными данными о насыщении пласта (вода или нефть) предварительно устанавливают граничные значения $\Psi_{гр}$ и $f_{гр}$ определяющие положение водонефтяного контакта.

Сравнивая измеренные текущие значения Ψ_i и f_i с граничными определяют принадлежность пласта к водоносному или нефтеносному.

Для выявления водо- и нефтеносных песчаников рекомендовано импульсный НКГ-нр комплексировать с ИНГК-рз. Заполнение скважины водой при ИНГК-нр мешает определению кислорода в породах.

В силу невысокой глубинности ИНГК-нр неупругое рассеяние преимущественно происходит на ядрах кислорода воды.

Определение кислорода целесообразно методические приемы учета влияния воды в скважине, например путем комплексирования с ИНГК-рз для регистрации захватного гамма-излучения водорода с энергией 2,23 МэВ.

Очевидно, что в случае комплексирования ИНГК-нр и ИНГК-рз временной селектор должен выделять импульсы в двух интервалах (Δt и $\Delta t'$), а блок амплитудного анализа должен сортировать импульсы по многим энергетическим окнам.

Так, о карбонатности коллекторов можно судить не только по отношению Si/Ca , но и по величине $Si / (Si+Ca)$.

Импульсный нейтронный гамма-метод успешно зарекомендовал себя на угольных месторождениях. По отношению C/O можно выявлять пласты угля с наибольшей теплотворной способностью.

При использовании импульсных сигналов о содержании углерода, кислорода и ряда элементов минеральной массы углей можно оценивать зольность углей в пробах больших размеров.

Контрольные вопросы

1. Физическая сущность импульсных нейтронных методов.
2. Аргументируйте основные преимущества импульсных нейтронных методов от стационарных нейтронных методов.
3. Опишите основные модификации импульсных нейтронных методов. Их принципиальные особенности по назначению и решаемым задачам.
4. Что такое время задержки в импульсном нейтронном методе? Из каких соображений осуществляется его выбор?
5. Что такое частота следования импульсов? Из каких соображений осуществляется его выбор?
6. Опишите ядерную реакцию получения 14 МэВ нейтронов генератора.
7. Природа временного распределения тепловых нейтронов после нейтронного импульса.

Контрольные вопросы

8. Каким образом можно повысить дифференцирующую способность ИННК-т при исследовании поглощающих свойств горных пород?
9. Объясните роль хлора как индикаторного элемента при отбивке водонефтяного контакта импульсным нейтронным методом.
10. Суть определения газоводяного контакта с помощью ИННК.
11. При каких условиях поле тепловых нейтронов не зависит от длины замедления быстрых нейтронов?
12. Глубинность ИННК. Факторы, влияющие на величину.
13. Влияние скважинных условий на результаты ИННК.
14. Физическая сущность и назначение двухзондового ИННК.
15. На чем основана возможность определения содержания элементов с большим сечением радиационного захвата нейтронов по данным ИННК?
16. Физические основы импульсного нейтронного гамма-метода радиационного захвата тепловых нейтронов для выделения руд.

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Укажите источники фонового γ -излучения в ИНГМ. Пути их снижения.
2. Суть оценки положения водонефтяного контакта по данным углеродно-кислородного импульсного НГК.
4. Каким образом осуществляется учет литологии пластов в С/О каротаже?
5. На чем основана возможность выделения угольных пластов по данным ИНГМ-нр?

Список литературы

1. Арцыбашев В.А. Ядерно-геофизическая разведка. – М.: Атомиздат, 1980, 321 с.
2. Якубович А.Л., Зайцев Е.И., Пржиялговский С.М. Ядерно-физические методы анализа минерального сырья. – М.: Атомиздат, 1982.
3. Мейер В.А., Ваганов П.А., Пшеничный Г.А. Методы ядерной геофизики. – Л.: Изд-во ЛГУ. 1988. – 376 с.
4. Старчик Л.П., Пак Ю.Н. Ядерно-физические методы контроля качества твердого топлива. – М.: Недра, 1985. – 224 с.
5. Ларионов В.В. Радиометрия скважин. – М.: Недра, 1969. – 327 с.
6. Резванов Р. Радиоактивные и другие неэлектрические методы исследования скважин. – М.: Недра, 1982.
7. Филиппов Е.М. Ядерная геофизика. Т.2. – Новосибирск: Изд-во Наука. Сибирское отд., 1973. – 400 с.
8. Ю.Н. Пак. Ядерные технологии в геофизических исследованиях. Изд-во КарГТУ, 346с. Учебник, 2016.
9. Пак Д.Ю., Пак Ю.Н. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях, Издательство КарГТУ, 106с, Учебное пособие, 2018.
10. Пак Д.Ю. Лабораторный практикум по ядерно-радиометрическим методам в геолого-геофизических исследованиях (часть 2), Издательство КарГТУ, 103с, Учебное пособие, 2019.
11. Пак Ю.Н., Пак Д.Ю. Монография. Методы и приборы ядерно-физического анализа углей. Изд-во КарГТУ, Караганда, 2012.
12. Пак Ю.Н. Пак Д.Ю. Геологиялық-геофизикалық зерттеулердегі ядролық-радиометриялық әдістер бойынша зертханалық практикум. Издательство КарГТУ, 107с, Учебное пособие, 2020.

На этом лекция завершена.
Спасибо за внимание!