

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

Лекция

Физические основы нейтрон-нейтронного метода

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



План лекции:

1. Общие сведения.
2. Определение влажности.
3. Изучение руд бора.
4. Нейтрон-нейтронный каротаж.
5. Изучение пористости горных пород.
6. Влияние скважинных условий в ННМ
7. Оценка характера насыщения пор

Общие сведения

Нейтрон-нейтронный метод (ННМ) основан на облучении пород быстрыми нейтронами и регистрации тепловых или надтепловых нейтронов.

ННМ-т заключается в регистрации плотности нейтронов, диффундирующих в системе скважина – пласт после их замедления до тепловых энергий.

Плотность тепловых нейтронов, измеряемая детектором при фиксированном размере зонда, зависит не только от длины замедления, но также от времени жизни τ и коэффициента диффузии D .

Последние два параметра характеризуют водородосодержание породы и концентрацию элементов с высокими сечениями поглощения тепловых нейтронов.

ННМ-н состоит в измерении плотности потока надтепловых нейтронов, замедленных в системе скважина – пласт, детектором находящимся на определенном расстоянии от источника нейтронов.

Регистрируемая детектором плотность потока надтепловых нейтронов зависит от длины замедления нейтронов, которая при оптимальном размере зонда определяется водородосодержанием исследуемого пласта и его химико-минералогическим составом.

Поэтому НМ-Н используется для определения объемного водородосодержания пласта, а при отсутствии в скелете породы химически связанной воды – для определения пористости и газонасыщенности.

Нейтронное поле зависит от замедляющих и поглощающих свойств среды. Замедление нейтронов определяется главным образом водородсодержанием горных пород, а поглощающие свойства зависят от присутствия элементов с аномально высокими сечениями захвата нейтронов (бор, марганец, хлор и др.).

Таблица – Нейтронные параметры минералов

Минерал	Формула	L_3 , см	t_3 , мкс	D , $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	τ , мкс
Кварц	SiO_2	29,6	51,1	2,73	1065
Глинозем	Al_2O_3	25,3	39,3	3,52	493
Гематит	Fe_2O_3	21,2	24,6	1,46	47
Лимонит	$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	5,2	2,2	1,24	62
Пирролюзит	M и O_2	21,1	38,3	1,98	10,6
Галит	NaCl	46,7	156,1	1,66	6
Киноварь	HgS	67,8	71,0	0,01	0,6
Галенит	PbS	78,4	297,9	4,57	364
Вода	H_2O	7,5	0,95	0,35	207

Определение влажности

Влажность наряду с плотностью является важнейшей характеристикой горных пород. Использование особенностей взаимодействия нейтронов с ядрами различных элементов позволило перейти к измерениям влажности пород непосредственно в условиях их естественного залегания.

В основу нейтрон-нейтронного метода определения влажности положена зависимость плотности потока нейтронов, замедлившихся в исследуемой породе, от содержания в ней водорода. Вокруг источника быстрых нейтронов, помещенного в анализируемую среду, образуется «облако» медленных нейтронов, количество которых пропорционально содержанию водорода, а значит объемной влажности.

Метод позволяет оценивать влажность пород в поверхностном слое, либо путем глубинных измерений. Для измерения влажности используют ампульные источники нейтронов ($Po-Be$, $Pu-Be$). Активность источников обычно равна $(6\div 8) \cdot 10^4$ нейтронов/сек.

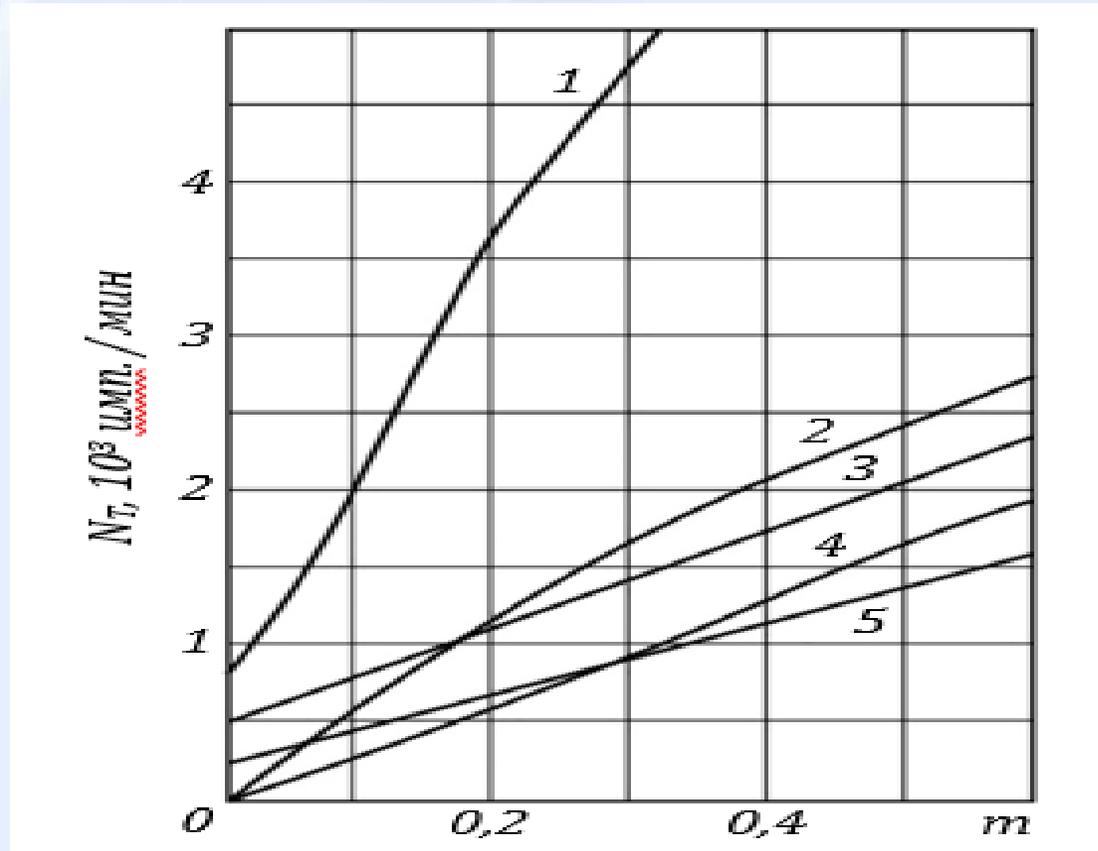
В качестве детекторов в нейтронных влагомерах чаще всего используют пропорциональные борные счетчики, реже – сцинтилляционные счетчики медленных нейтронов. Для регистрации тепловых нейтронов иногда используют газоразрядные счетчики Гейгера-Мюллера, окруженные тонким слоем кадмия. Счетчик регистрирует возникающее в кадмии гамма-излучение радиационного захвата тепловых нейтронов.

Представленным влагомерам свойственна различная чувствительность, характеризующая относительное приращение измеряемого сигнала при единичном изменении влажности.

Наблюдаемая дифференциация чувствительности нейтрон-нейтронного метода к влажности объясняется множественностью факторов, влияющих на значение чувствительности: тип детектора, длина зонда, особенности зондового устройства, наличие дополнительного замедлителя, уровень фонового излучателя и др.



Эталонировочные графики скважинных влагомеров, приведенные к мощности источника 10^4 нейтр./с



1 – зонд фирмы «Danbridge»; 2 – зонд фирмы «Nuclear Enterprises»; 3 – зонд фирмы «de Boodt» с парафиновым замедлителем вокруг источника; 4 – зонд фирмы «Nuclear Chicago»; 5 – зонд фирмы «de Boodt» без парафинового замедлителя

Важной характеристикой нейтронного метода определения влажности в условиях естественного залегания пород является объемная представительность измерений. Рассеяние и замедление нейтронов происходят в некотором объеме исследуемой среды. Объемная представительность оценивается глубиной $R_{0,9}$, т.е. радиусом сферы вокруг источника нейтронов, в которой рассеивается и замедляется 90 % регистрируемых нейтронов.

Глубина ННМ тесно связана с длиной замедления нейтронов L_3 . Для зондов небольшой длины (до 25 см) глубина оценивается

$$R_{0,9} = 2,1 L_3$$

С увеличением длины зонда глубина растет незначительно. Поскольку длина замедления существенно снижается с ростом водородосодержания, глубина ННМ определяется в основном влажностью и в меньшей степени плотностью среды.

Для горных пород с плотностью около 2г/см^3 глубинность ННМ-т при влажности 10% составляет 25-30 см, а при нулевой влажности соответственно около 80 см. Глубинность ННМ-н незначительно ниже таковой для метода по тепловым нейтронам. Точность количественных оценок влажности пород во многом зависит от вещественного состава, в частности наличия элементов – аномальных поглотителей тепловых нейтронов (Cl, B, Li, Cd, Mn и др.). Увеличение концентрации этих поглощающих элементов приводит к снижению плотности потока тепловых нейтронов и следовательно, к занижению показаний нейтронного влагомера (доинверсионный зонд).

Наиболее эффективным способом снижения дестабилизирующего влияния непостоянства нейтронно-поглощающих свойств среды на результаты определения влажности является использование ННМ-Н.

Таким образом, ННМ позволяет измерять влажность вне зависимости от физического состояния горной породы. Измерения осуществляются непосредственно в изучаемом массиве горной породы, без нарушения ее естественного сложения и происходящих в ней процессов.

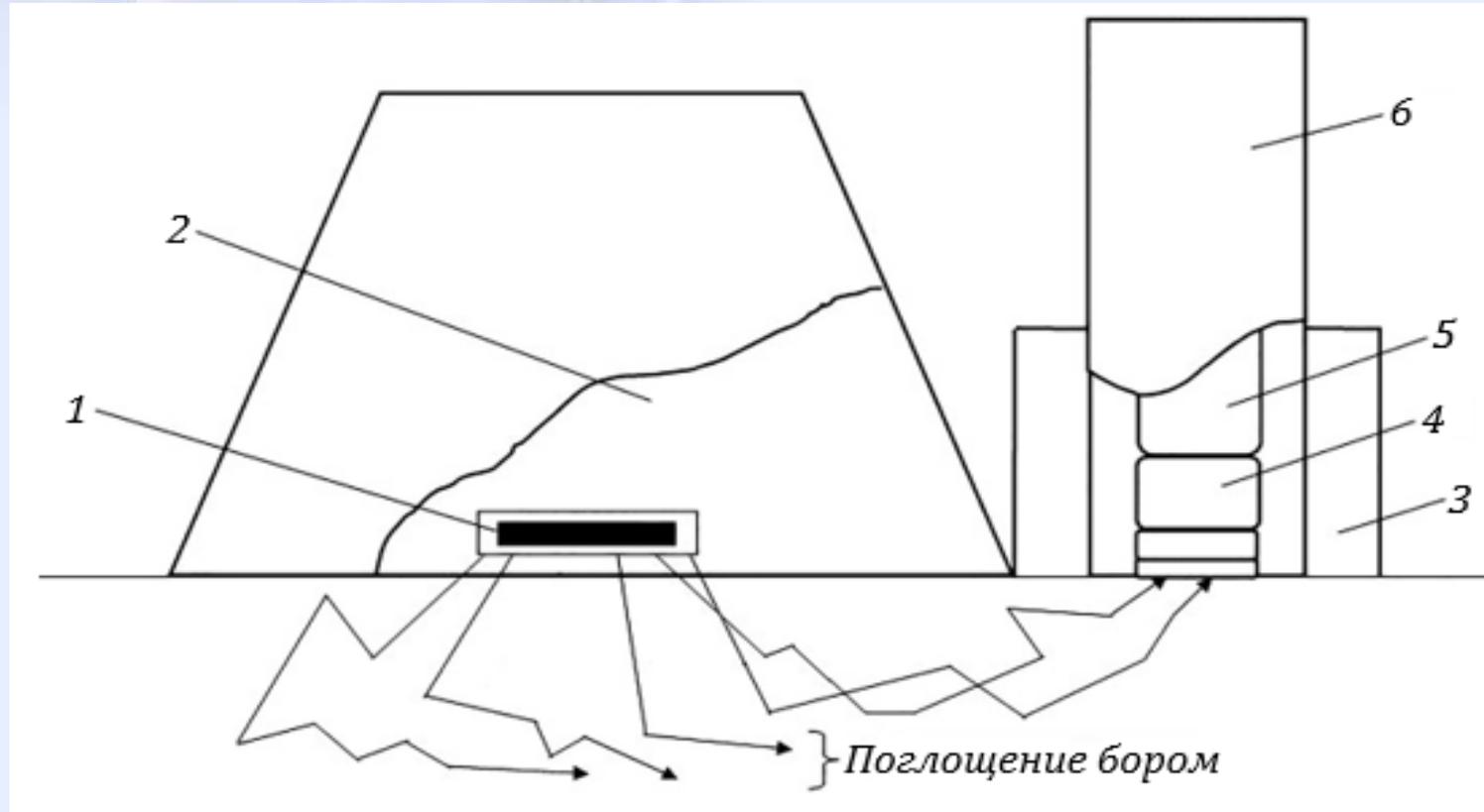
Изучение руд бора

Возможность количественного определения концентрации бора в рудах базируется на аномально высокой способности ядер бора-10 поглощать тепловые нейтроны.

Сечение радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами B^{10} составляет около 4000 барн, а для природного бора – 755 барн.

Если в основу нейтронного метода измерения влажности в основном положен процесс замедления быстрых нейтронов, то в данном случае конечные аналитические параметры связаны с процессами диффузии тепловых нейтронов и их поглощения ядрами элементов, слагающих исследуемую горную породу.

Схема приставного нейтронного борметра



1 – источник нейтронов; 2 – парафиновый блок; 3 – обойма крепления блока с источником на корпусе датчика; 4 – детектор тепловых нейтронов; 5 – фотоэлектронный умножитель; 6 – корпус датчика

Методика работы с борметром заключается в следующем. Приставной блок и радиометр устанавливают на исследуемую поверхность. Испускаемые нейтроны попадают в породу, где рассеиваются и поглощаются. Чем больше бора содержится в горной породе, тем сильнее ослабление потока и тем меньше скорость счета импульсов от детектора.

При низких содержаниях бора зависимость характеризуется резким спадом, в то время как при высоких концентрациях кривая выглаживается. Соответственно этому точность определения бора при высоких концентрациях ниже.

Глубинность исследования зависит от химического состава пород и их влагосодержания. С увеличением влажности повышается замедляющая способность среды.

В породах с большим количеством водорода нейтроны замедляются в нескольких сантиметрах от источника и быстро захватываются ядрами атомов. Если влажность породы не превосходит 5%, а содержание аномальных поглотителей (хлор, кадмий) составляют не более долей процента, то глубинность зоны исследования равна 20-30%.

Предел обнаружения бора составляет около 0,1%. На показания борметра сильно влияет присутствие в исследуемых породах повышенных содержаний элементов, являющихся сильными поглотителями нейтронов, таких как хлор, кадмий.

Нейтронно-борметрический метод обладает высокой чувствительностью и в отсутствии хлорного засоления достигает $n \cdot 10^{-3}$ % бора. При наличии хлора точность измерений и чувствительность определения бора падает, так как повышение концентрации хлора отражается на нейтрон-нейтронных измерениях. Выяснено, что содержание в почве 0,01% B_2O_3 дает аномалию такой же величины, какую дает 0,6% $NaCl$.

Учесть влияние хлора удастся, если одновременно с нейтрон-нейтронными измерениями производить измерения γ -излучения радиационного захвата.

Влияние хлора можно исключить путем измерения надтепловых нейтронов, так как эффективное сечение для хлора в этой области резко уменьшится и на результаты измерений будет оказывать влияние главным образом бор.

Нейтронно-абсорбционное определение бора может быть затруднено при наличии в рудах значительных концентраций железа, имеющего сравнительно большое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов (2,6 барн). Содержание железа, эквивалентное по поглощающей способности нейтронов $0,01\text{В}$, составляет около 15%. Для количественного анализа руд на содержание бора чаще используют зонды небольшого размера, при которых слабо сказывается переменное водородосодержание.

Методически важной задачей нейтронных исследований на бор является учет концентрационного вырождения эталонировочной зависимости в области высоких содержаний бора в руде.

Изучение руд редкоземельных элементов

Известен опыт успешного применения ННМ для исследования руд редкоземельных элементов. Основная трудность количественной оценки качества руд связана с влиянием переменного водородосодержания. Рассмотрена методика учета переменного водородосодержания, основанная на использовании двух модификаций нейтронного метода: ННМ-т и ННМ-н с различными зондами. Порог чувствительности анализа на редкоземельные элементы составил 0,02%. Имеется опыт практического использования ННМ-т для изучения руд ртути с симметричным 4π-зондом длиной 31 см.

Основным мешающим фактором при исследовании комплексных руд ртути является сурьма, имеющая повышенное сечение радиационного захвата тепловых нейтронов (~5,5 барн). При содержании ртути 0,3% наличие в руде 0,1% сурьмы вносит погрешность в определении ртути, равную 3%.

Имеются благоприятные перспективы применения ННМ-т для изучения руд лития, марганца. Основные дестабилизирующие факторы: концентрационное вырождение эталонировочных графиков, переменное водородосодержание, влияние скважинных условий.

Нейтрон-нейтронный каротаж

ННК – метод изучения разрезов скважин, при котором горные породы облучают потоком быстрых нейтронов и регистрируют тепловые или надтепловые нейтроны. В качестве источника нейтронов обычно используют полониево-бериллиевые источники (Po-Be), испускающие быстрые нейтроны с энергией ~ 4 МэВ. Между источником и детектором располагается защитный экран, содержащий высокоэффективный замедлитель быстрых нейтронов и ослабляющий гамма-излучение материал с большим атомным номером.

Плотность потока замедленных нейтронов в геометрии скважинных измерений зависит от замедляющей способности среды, в частности водородосодержания, и нейтронно-поглощающей способности горной породы, зависящей от ее вещественного состава.

Дифференцировать вклад процессов рассеяния быстрых нейтронов и поглощения тепловых нейтронов сложно при стационарных нейтрон-нейтронных измерениях.

Основное назначение ННК – оценка водородосодержания горных пород и выделение в них элементов с аномально большими сечениями радиационного захвата тепловых нейтронов.

Влажность пород непосредственно связана с пористостью. Это позволяет с помощью ННК дифференцировать осадочные горные породы по литологическим признакам и исследовать свойства пластов как коллекторов нефти и газа.

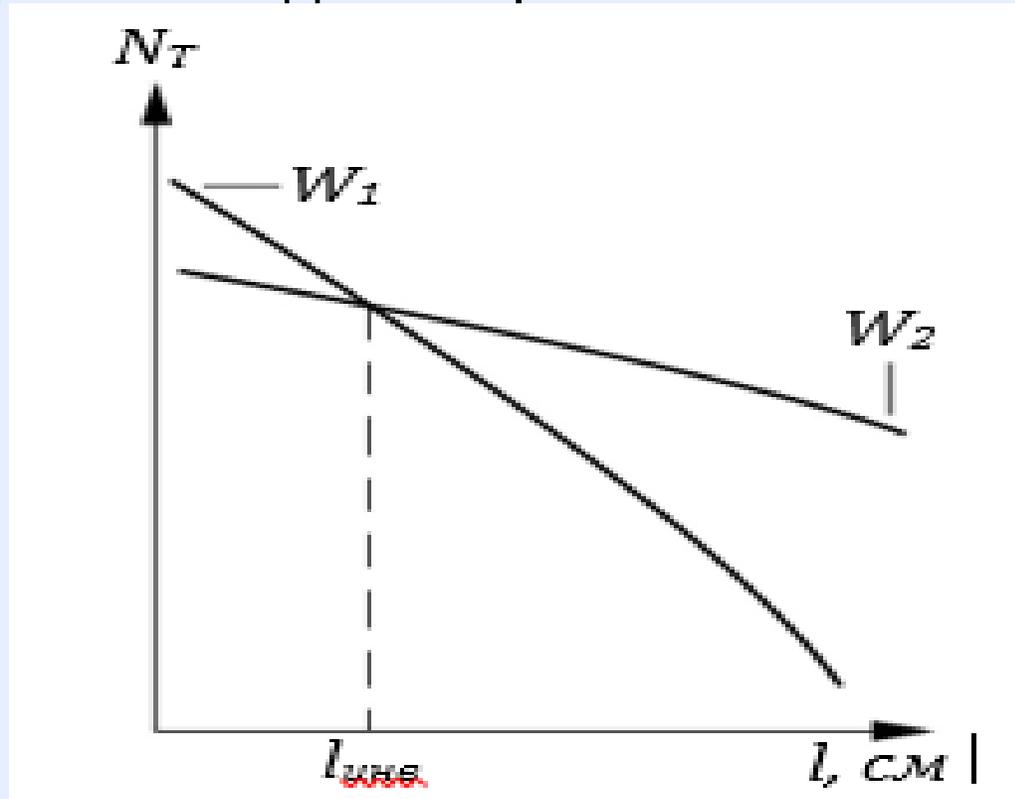
Изучение пористости горных пород

При увеличении водородсодержания горных пород увеличивается замедляющая способность среды, и как следствие растет плотность потока тепловых нейтронов. Однако не всегда увеличение водородсодержания приводит к увеличению интенсивности тепловых нейтронов, регистрируемых детектором. Соответствие между плотностью потока тепловых нейтронов в среде и его значением, достигающим до детектора во многом определяется длиной зонда и наличием аномальных поглотителей в среде.

Характер распределения поля тепловых нейтронов зависит от длины зонда, от замедляющих свойств среды, которое определяется водородсодержанием и поглощающих свойств среды, которое зависит от наличия элементов с аномально высоким сечением радиационного захвата тепловых нейтронов.



В общем случае зависимость интенсивности тепловых нейтронов от длины зонда и водородосодержания горных пород выглядит следующим образом (рисунок). Быстрые нейтроны во влажной среде замедляются в узкой зоне, расположенной близко к источнику, и если длина зонда небольшая, то тепловые нейтроны достигают детектора.



Зависимости числа тепловых нейтронов от длины зонда для пород с различным водородосодержанием ($W_1 > W_2$)

При увеличении длины зонда число тепловых нейтронов, достигающих детектора резко уменьшается, т.к. тепловые нейтроны проходя большой путь в исследуемой среде ослабляются больше. Поэтому чем больше длина зонда, тем показания будут меньше.

Спад интенсивности тепловых нейтронов с ростом длины зонда, происходит более резко в среде с повышенным водородосодержанием (W_1). Это приводит к тому, что зависимости пересекаются. Длина зонда, при которой происходит пересечение двух кривых называется инверсионной длиной зонда, которая примерно равна удвоенной длине замедления, что составляет около 20-30 см для осадочных пород.

Инверсионный зонд не чувствителен к водородсодержанию W , т.е. в двух разных средах наблюдается одинаковое значение потока тепловых нейтронов.

В доинверсионной области (левее точки пересечения) с увеличением водородсодержания растет плотность тепловых нейтронов за счет интенсивного замедления быстрых нейтронов преимущественно на ядрах водорода.

Поэтому при малых длинах зонда с увеличением водородсодержания число тепловых нейтронов достигающих детектора увеличивается. Высокопористые породы, содержащие водородсодержащий флюид (вода, нефть) будут отмечаться на диаграммах НК-Т положительными аномалиями. Подобная закономерность имеет место только при малой длине зонда и отсутствии в исследуемой среде аномальных поглотителей.

В заинверсионной области (длина зонда ~40-60 см) с увеличением W в среде увеличивается плотность потока тепловых нейтронов, по причине повышенной замедляющей способности. Во влажной среде максимум тепловых нейтронов наблюдается как правило вблизи источника. Нейтроны в процессе диффузии и движения к детектору, удаленному от источника испытывают при этом радиационный захват. Следовательно до детектора их доходит меньше. Иными словами водород, обладая высоким сечением упругого рассеяния интенсивно переводит быстрые нейтроны в тепловые. Но в то же время водород обладает и сравнительно большим сечением радиационного захвата тепловых нейтронов, что и приводит к их поглощению.

Водород, являясь как бы источником тепловых нейтронов, является и их поглотителем. Поглощение при этом будет тем больше, чем больше водородсодержание. Поэтому при больших длинах зонда с увеличением водородсодержания число тепловых нейтронов, достигающих детектора, уменьшается.

В практике ННК используются заинверсионные зонды (длина зонда ~40-60 см) по причине максимальной дифференциации от водородсодержания.

Таким образом, на диаграммах ННК пористые пласты (с высоким водородсодержанием) отличаются минимальными показаниями, а менее пористые пласты (с низким водородсодержанием) – максимальными показаниями.

Поскольку ННМ имеет две модификации, то представляет интерес, как будут выглядеть зависимости, если измеряется поток не тепловых, а надтепловых нейтронов (0,1-1эВ). Качественно зависимости будут одинаковыми.

Отличие в том, что точка пересечения приходится при меньших расстояниях. Это связано с тем, что для надтепловых нейтронов, имеющих большую энергию, чем тепловые нейтроны, необходимо меньшее расстояние, где происходит компенсация прироста надтепловых нейтронов за счет замедления быстрых и убыли надтепловых за счет радиационного захвата.

Наличие в исследуемых объектах элементов с большим сечением радиационного захвата по разному и сложным образом влияет на характер распределения тепловых и надтепловых нейтронов. С увеличением концентрации элементов – поглотителей плотность потока тепловых нейтронов падает.

Таким образом, наиболее благоприятными условиями для определения пористости пород ННК являются отсутствие аномальных поглотителей и низкая минерализация пластовых вод (<50 г/л NaCl). В этом случае ННМ как по тепловым, так и по надтепловым нейтронам дает информацию о величине пористости (общее водородсодержание).

Но эффективен ННМ-Т в силу того, что его результаты более чувствительны к водородосодержанию.

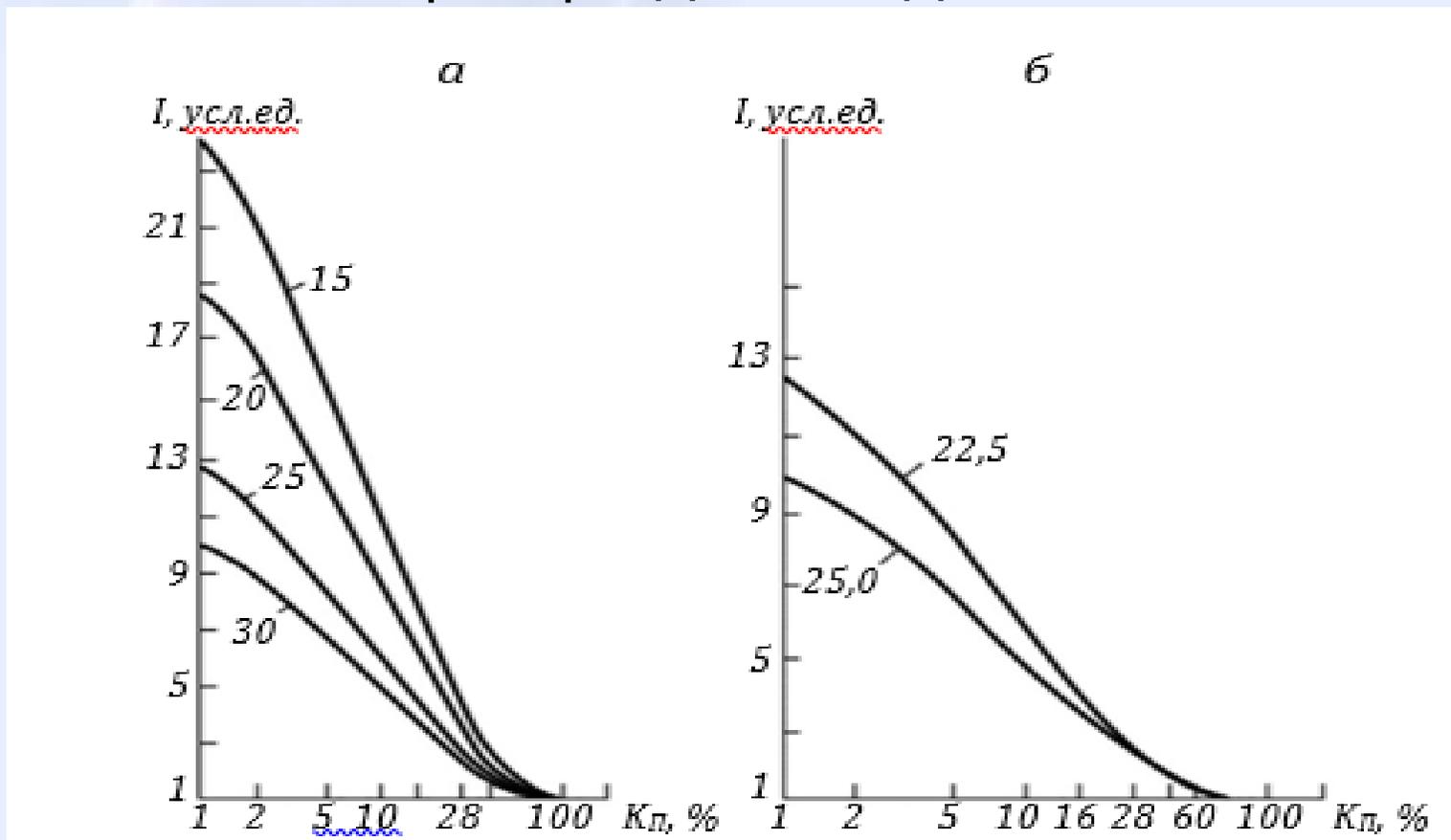
При наличии в среде аномальных поглотителей или же высокой минерализации ($>100-200$ г/л $NaCl$) для оценки пористости пород необходимо использовать ННМ по надтепловым нейтронам.

При использовании ННМ-Т наличие хлора в пластовых водах искажает результаты в силу захвата части тепловых нейтронов хлором, имеющим большое сечение радиационного захвата тепловых нейтронов.

Нефтяные месторождения, как правило связаны с карбонатными и песчано-глинистыми разрезами. Известняки, доломиты и песчаники существенно различаются между собой по нейтронным свойствам.

Например, длина замедления нейтронов может различаться для этих пород на 50%. Поэтому при оценке пористости эти различия необходимо учитывать.

Зависимость показаний НК-50 от пористости пластов.
Приборы ДРСТ-1, ДРСТ-3



а – необсаженная скважина; порода – известняк;
б – скважина, обсаженная; порода – песчаник. Шифр кривых – d_c в см

Влияние скважинных условий в ННМ

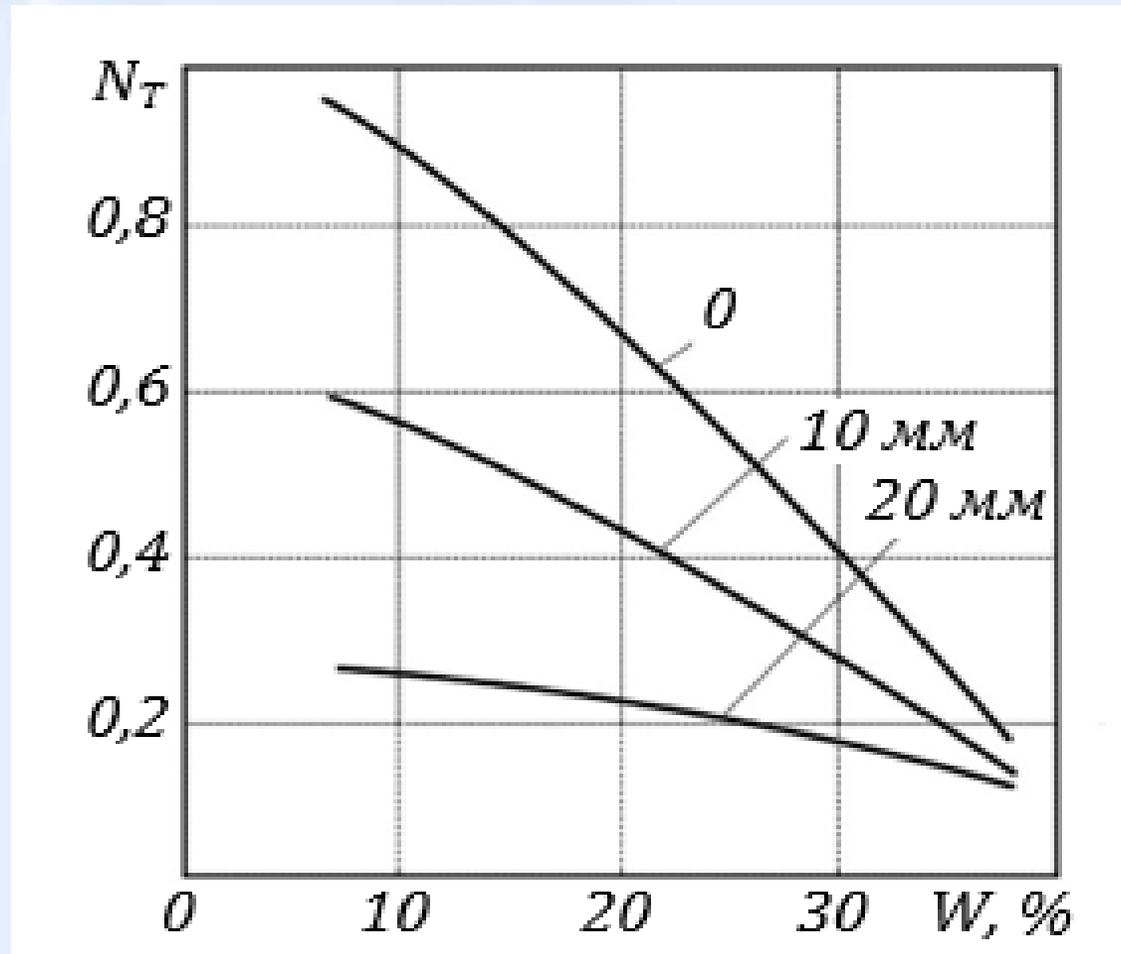
Плотность тепловых и надтепловых нейтронов зависит не только от замедляющей и поглощающей способности среды, но и от конструктивных особенностей скважины и прибора: диаметра скважины, наличия и типа обсадки, цемента, глинистой корки, минерализации по хлору и т.д.

В большинстве случаев влияние этих факторов связано с изменением толщины водородсодержащего заполнителя скважины (буровой раствор, глинистая корка, цемент), окружающего прибор.

Влияние глинистой корки сказывается сильнее при меньшем водородсодержании. С увеличением толщины глинистой корки плотность тепловых нейтронов уменьшается за счет дополнительного поглощения.

Кроме этого, с увеличением толщины глинистой корки чувствительность к водородсодержанию падает.

Зависимости плотности тепловых нейтронов от водородсодержания карбонатных пород. Шифр кривых-толщина глинистой корки, мм



При определении пористости обычно вносят поправку на глинистую корку на основе независимого измерения толщины корки с помощью коркомера.

Наличие слоя бурового раствора оказывает аналогичное действие на результаты ННМ, как и глинистая корка. Наличие в скважине цементного кольца приводит к уменьшению плотности потока тепловых нейтронов, поскольку цемент по водородсодержанию эквивалентен горной породе с объемной влажностью ~50%. Изменение содержания хлора в буровом растворе заметно сказывается лишь на плотности тепловых нейтронов.

На показания ННМ по надтепловым нейтронам изменение минерализации пластовых вод и бурового раствора практически не сказывается. В этом и заключается основное преимущество ННМ-Н перед ННМ-Т.

Таким образом, при оценке пористости по водородсодержанию ННМ используются предварительно найденные для данных скважинных условий измерения зависимости $N=f(W)$, полученные при различных скважинных условиях.

В ряде случаев находят применение двухзондовые модификации ННК, представляющие собой различное сочетание зондов, использующих инверсионную, доинверсионную и заинверсионную области. Такие многозондовые модификации ННК в сравнении с однозондовыми в меньшей степени подвержены дестабилизирующему влиянию изменений скважинных условий измерений и конструктивных особенностей зондовых устройств и измерительной аппаратуры. Кроме того многозондовый нейтронный каротаж позволяет упростить методику градуировки и нормирования показаний без опорных пластов.

Точность количественной оценки пористости горных пород зависит от методики интерпретации результатов ННК и эталонирования. Существуют различные подходы.

Способ эталонирования с использованием кернового опробования предусматривает сопоставление показаний ННК с результатами определения пористости пород по керну.

Способ характеризуется высокой трудоемкостью. Широкое распространение получил палеточный способ, основанный на предположении о линейной зависимости интенсивности нейтронов от логарифма пористости пород. На основе экспериментальных данных строят палетки, связывающие нормированные показания метода, дифференцированные по типам пород и аппаратуры с учетом поправок за скважинные условия.

Находит широкое применение способ опорных пластов с использованием линейной взаимосвязи между показаниями ННК и логарифмом коэффициента пористости. В качестве опорных пластов выбирают плотные известняки, пористость которых 2-3%, глины, показания против которых соответствуют 35-40% пористости или другие породы с выдержанной пористостью на большей площади. В качестве аналитического параметра выбирают нормированный разностный параметр. Точность определения пористости пород нейтронным методом при самых благоприятных условиях и стандартизации измерений составляет около 10% отн.

Оценка характера насыщения пор

Пространственное распределение тепловых нейтронов определяется не только замедляющими свойствами горных пород, но и их диффузионно-поглощающими характеристиками, зависящими от длины диффузии L_d , коэффициента диффузии D и времени жизни теплового нейтрона τ .

Указанные параметры меняются в основном в зависимости от наличия в горных породах элементов с аномально высокими поглощающими свойствами. В осадочных породах в заметных количествах присутствует хлор, содержащийся в пластовых водах.

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 практически одинаковое содержание водорода. ННК-т и ННК-н не различают водо- и нефтенасыщенные пласты, определяя в обоих случаях только величину коэффициента пористости.

Благоприятным условием для определения характера насыщения пор является минерализованная вода. Повышенная минерализация пластовых вод (100-200 г/л NaCl) искажает контроль коэффициента пористости методом ННК-Т за счет радиационного захвата тепловых нейтронов ядрами хлора, эффективное сечение которого равно 32,6 барн.

Этот эффект можно использовать для определения характера заполняющей поры жидкости с помощью ННК-т (определение водо-нефтяного контакта – ВНК). Содержание хлора в породах пропорционально минерализации пластовой жидкости по NaCl.

Показания нейтронного метода находятся в зависимости не только от водородосодержания (пористости), но и хлорсодержания. В благоприятных случаях разность показаний ННК-Т против нефтеносных и водоносных пластов может достигать 30-50%. Показания ННК-т против минерализованного водоносного пласта отмечаются пониженными значениями по отношению к нефтеносному пласту.

В необсаженных скважинах влияние минерализации пластовых вод обычно незначительное из-за вытеснения пластовой воды в зоне проникновения пресным фильтратом бурового раствора. В обсаженной и зацементированной скважине равновесие в пласте восстанавливается спустя 2-3 недели.

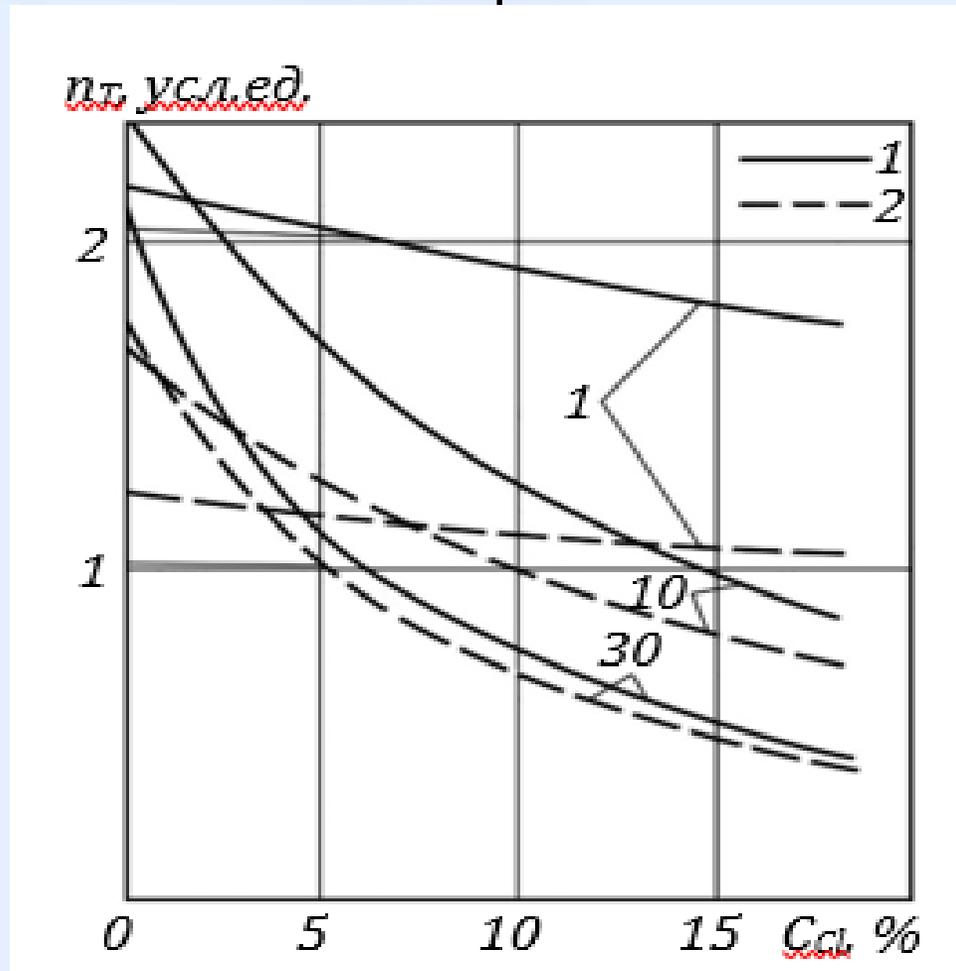
Кроме того, наблюдается засоление цементного кольца против соответствующих пластов. В таких условиях амплитуда аномалии НК-Т против водонасыщенной части пласта на 13-20% меньше чем против нефтенасыщенной (диаметр скважины 237 мм, диаметр обсадки 153 мм, зонд 50 см).

Таким образом повышенная минерализация бурового раствора (более 100 г/л NaCl) уменьшает скорость счета НК-Т в результате поглощения тепловых нейтронов ядрами хлора. Например, при измерениях в емкостях, заполненных соленой (100 г/л NaCl) и пресной водой, разница в скоростях счета тепловых нейтронов при длине зонда 12 см составила 45%.

В высокопористых горных породах четко проявляется связь показаний ННК-т от минерализации пластовой жидкости, поскольку пределы изменения абсолютной величины содержания хлора существенно расширены. При увеличении хлорсодержания в пластовой жидкости плотность тепловых нейтронов снижается независимо от расстояния до источника. Инверсии в распределении плотности тепловых нейтронов от изменений поглощающих свойств горной породы не наблюдается.

В коллекторах, насыщенных нефтью, значительная часть тепловых нейтронов поглощается ядрами водорода, а в пластах, насыщенных минерализованной водой – ядрами хлора, у которого сечение радиационного захвата тепловых нейтронов примерно в 100 раз больше, чем у водорода. Чем больше минерализация, тем более дифференцированы показания ННК-т.

Зависимость плотности тепловых нейтронов от весового содержания в пластовых водах хлора для песчаников (1) и известняков (2), шифр кривых – пористость



Характерной особенностью стационарных нейтрон-нейтронных методов является то, что длина диффузии тепловых нейтронов в пористых породах, насыщенных водой или нефтью, составляет несколько см, что намного меньше длины замедления быстрых нейтронов. Поскольку хлор практически не влияет на замедляющую способность, то глубинность ННК-т по хлорсодержанию заметно ниже глубинности метода к водородосодержанию.

При оценке глубинности применительно к хлорсодержанию важными информативными параметрами являются диаметр скважины и зона проникновения скважинной жидкости в пласт.

Контрольные вопросы

1. Суть и назначение нейтрон-нейтронных методов. Решаемые задачи.
2. Укажите основные нейтронно-замедляющие и нейтронно-поглощающие характеристики горных пород, влияющие на результаты ННМ.
3. Принципиальные отличия нейтронных методов, основанных на измерении тепловых и надтепловых нейтронов.
4. Физическая сущность определения влажности горных пород нейтрон-нейтронным методом.
5. Глубинность нейтрон-нейтронного метода. Теоретический расчет глубинности. Факторы, влияющие на ее величину.
6. Объясните механизм и природу влияния аномальных поглотителей тепловых нейтронов на результаты определения водородосодержания пород ННМ.
7. На чем основана возможность количественного определения концентрации элементов-аномальных поглотителей тепловых нейтронов?

Контрольные вопросы

8. Укажите основные факторы, снижающие точность количественного анализа руд, содержащих поглотители тепловых нейтронов.
9. Разновидности ННК. Назначение, решаемые задачи и особенности их реализации в скважинных условиях.
10. Дать понятие об инверсионных зависимостях в ННК. Доинверсионный, заинверсионный зонды. Их особенности при оценке пористости горных пород.
11. Обоснуйте необходимость учета литологии пластов при оценке пористости пород нейтрон-нейтронными методами.
12. Суть двухзондовой методики ННК. Ее преимущества и область применения.
13. Способ опорных пластов в процессе интерпретации результатов ННК.
14. Физическая сущность оценки характера насыщения пор по данным ННК-т.
15. Какую роль выполняет минерализация пластовых вод при определении водо-нефтенасыщенности пластов?

Вопросы для самостоятельного изучения

1. Укажите основные нейтронные параметры минералов и горных пород, влияющие на пространственное распределение тепловых нейтронов.
2. Обоснуйте выбор оптимальной модификации ННК для оценки пористости пород в условиях минерализации пластовых вод.

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!