НЕОБХОДИМОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАЛИБРОВОЧНО-ПОПРАВОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ АППАРАТУРЫ НЕЙТРОНОГО КАРОТАЖА С ЗОНДОМ ННК-Т

Н.Е. Фролов, *студент*
Л.И. Гимазиева, *студент*
Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, г. Уфа)

DOI:10.24412/2500-1000-2025-10-2-119-124

Аннотация. *В статье представлены результаты разработки калибровочно-поправочной функции (КПФ) для аппаратуры нейтронного каротажа с зондом ННК-Т, предназначенной для определения коэффициента пористости водонасыщенных горных пород. Особое внимание уделено учету влияния концентрации хлористого натрия в пласте на точность измерений. Проведен анализ измеряемых и влияющих величин, обоснована конструкция эталонов, разработана структурная схема измерительной системы. Построена КПФ в виде полинома второй степени, проверена её точность. Результаты исследования позволяют повысить точность определения коэффициента пористости в реальных скважинных условиях.*

Ключевые слова: *нейтронный каротаж, коэффициент пористости, хлоросодержание, калибровочно-поправочная функция, эталоны, структурная схема.*

Нейтронный каротаж по тепловым нейтронам (ННК-Т) широко применяется для определения водородосодержания горных пород, что позволяет косвенно оценивать их пористость. Однако наличие хлоросодержащих соединений, таких как NaCl, может значительно искажать результаты измерений. Это особенно актуально для нефтегазовых месторождений, где точность определения коэффициента пористости напрямую влияет на оценку запасов и эффективность разработки. В данной работе предложена методика построения калибровочно-поправочной функции (КПФ), учитывающей влияние концентрации NaCl в пласте, что позволяет повысить точность измерений.

Коэффициент общей пористости (Кп) является ключевым параметром при оценке коллекторских свойств горных пород. Он определяется как отношение объёма пор к общему объёму породы и выражается в процентах. В данной работе рассматривается диапазон значений Кп от 1% до 40%, что охватывает большинство типов коллекторов.

Одной из ключевых влияющих величин является концентрация хлористого натрия (NaCl) в пласте. Хлор, входящий в состав NaCl, обладает высоким сечением захвата тепловых нейтронов. Это означает, что при взаимодействии нейтронов с ядрами хлора происходит их интенсивное поглощение, что приводит к снижению количества регистрируемых тепловых нейтронов. В результате относительный выходной сигнал зонда ННК-Т может изменяться на 5-10% при увеличении концентрации NaCl с 0 до 150 г/л. Это искажает результаты измерений коэффициента пористости, особенно в пластах с высокой минерализацией.

Диаметр скважины также является важным параметром, влияющим на распределение нейтронного потока. В скважинах с диаметром 216 мм, который принят в данной работе как константа, нейтронный поток распределяется таким образом, что позволяет проводить измерения с минимальными искажениями. Однако в скважинах с большим диаметром нейтронный поток рассеивается сильнее, что может приводить к занижению показаний приборов.

Минералогический состав породы оказывает значительное влияние на результаты измерений. Разные минералы, такие как известняк, песчаник и доломит, имеют различную способность к замедлению и поглощению нейтронов. Например, известняки и доломиты содержат больше кальция и магния, что влияет на распределение нейтронного потока и, как следствие, на показания приборов.

Скважинная среда является неоднородной, что обусловлено наличием различных материалов, таких как пласт, промывочная жид-

кость, цементное кольцо и обсадная колонна. В бурящейся скважине зонд ННК-Т взаимодействует со стенкой скважины и пластом, а в обсаженной скважине – с цементным кольцом и обсадной колонной. Эти материалы имеют разную способность к замедлению и поглощению нейтронов, что необходимо учитывать при калибровке приборов. Типовые структуры показаны на рисунке 1.

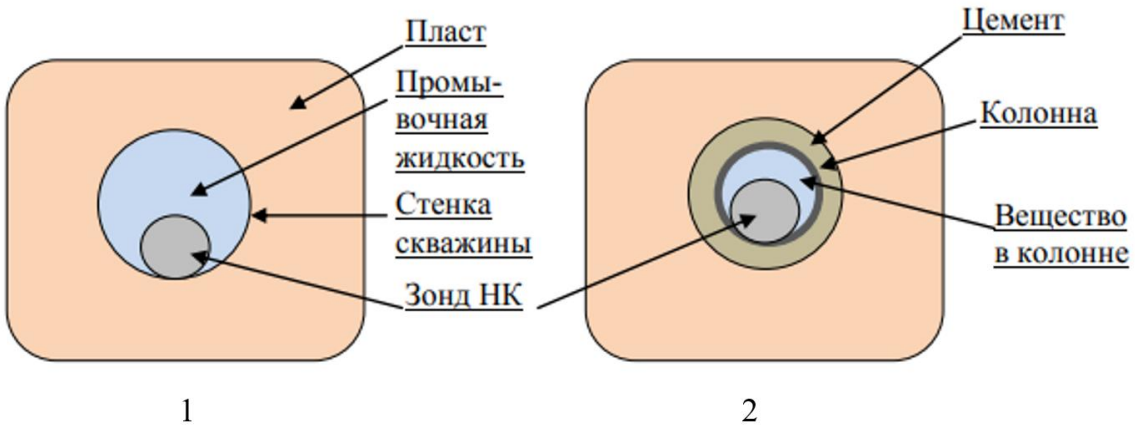

Рис. 1. Типовые структуры неоднородной среды при прямых измерениях коэффициентах пористости пласта горной породы, пересеченной скважинной
1 – при расположении зонда НК на стенке бурящейся скважины;
2 – при расположении зонда НК на стенке колонны в скважине с бездефектным цементным кольцом (с эксцентриситетом колонны «0»)

Механизм влияния NaCl на показания ННК-Т:

1. Поглощение нейтронов: Хлор, содержащийся в NaCl, обладает высоким сечением захвата тепловых нейтронов. Это приводит к уменьшению количества нейтронов, достигающих детектора, и, как следствие, к занижению показаний прибора.

2. Изменение спектра нейтронов: Поглощение нейтронов хлором изменяет энергетический спектр нейтронного потока, что может влиять на чувствительность детектора и приводить к дополнительным погрешностям.

3. Влияние на калибровку: Присутствие NaCl в пласте требует дополнительной калибровки приборов, так как стандартные калибровочные кривые, полученные для пресных пластов, могут давать значительные ошибки в условиях высокой минерализации.

Таким образом, для точного определения коэффициента пористости необходимо учитывать концентрацию NaCl в пласте, диаметр скважины и минералогический состав породы. Эти факторы оказывают значительное влияние на распределение нейтронного потока и, как следствие, на показания приборов ННК-Т.

Для реализации методики прямых измерений коэффициента пористости пластов с учётом влияния концентрации хлористого натрия была разработана структурная схема измерительной системы. Основная задача системы – обеспечить одновременное измерение коэффициента пористости и концентрации NaCl в пласте, что позволяет корректировать показания с учётом влияния минерализации.

Структурная схема измерительной системы включает в себя три основных блока:

1. Зонд ННК-Т – предназначен для измерения коэффициента пористости. Он регистрирует поток тепловых нейтронов, который зависит от водородосодержания породы. Зонд состоит из источника быстрых нейтронов и детекторов тепловых нейтронов, что позволяет оценивать пористость пласта.

2. Зонд для измерения концентрации хлора в пласте – используется для определения содержания NaCl. Этот зонд может быть основан на методе индукционного каротажа или спектроскопии, что позволяет оценивать концентрацию хлора в пластовой жидкости. Полученные данные необходимы для корректировки показаний зонда ННК-Т.

3. Канал связи и микроконтроллер с КПФ – обрабатывает сигналы от обоих зондов и вы-

числяет скорректированное значение коэффициента пористости с учётом влияния NaCl. Микроконтроллер использует калибровочно-поправочную функцию (КПФ), которая учитывает зависимость показаний зонда ННК-Т от концентрации хлора.

Структурная схема системы представлена на рисунке 2.

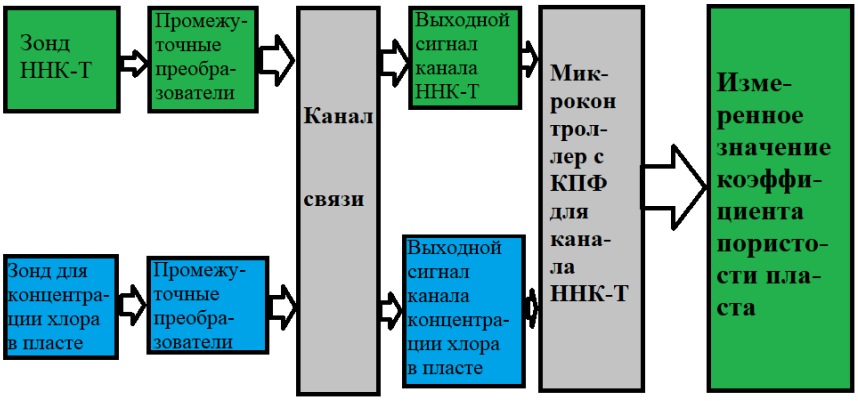

Рис. 2. Структурная блок-схема ГИС для совместных измерений Кп, концентрации хлористого натрия в пласте

Преимущества разработанной структурной схемы:

1. Одновременное измерение коэффициента пористости и концентрации NaCl позволяет оперативно корректировать данные и повышать точность измерений.

2. Использование КПФ обеспечивает учёт влияния минерализации на показания зонда ННК-Т, что особенно важно для пластов с высоким содержанием солей.

3. Модульная структура системы позволяет легко модернизировать её, добавляя новые датчики или изменяя алгоритмы обработки данных.

Минералогический состав пород оказывает значительное влияние на распределение нейтронного потока и, как следствие, на показания зонда ННК-Т. В рамках исследования были проанализированы три типа пород: известняк, песчаник и доломит.

Известняк характеризуется высоким содержанием кальция, что обусловливает умеренное поглощение нейтронов. Однако присутствие даже незначительных количеств хлора может приводить к существенному искажению сигнала из-за высокого сечения захвата нейтронов хлором.

Песчаник содержит большое количество кремнезёма, который слабо взаимодействует с нейтронами. В результате нейтронный поток в песчаниках распределяется более равномерно, что снижает влияние хлоросодержания на показания зонда. Однако в песчаниках с глинистым цементом возможно дополнительное поглощение нейтронов за счёт наличия гидроксильных групп.

Доломит отличается высоким содержанием магния, который, подобно кальцию, слабо поглощает нейтроны. Однако доломиты часто содержат примеси солей, что может увеличивать влияние хлоросодержания на результаты измерений.

Для количественной оценки влияния минералогического состава были проведены эксперименты на эталонах из разных пород с одинаковым коэффициентом пористости (15%) и концентрацией NaCl (50 г/л). Результаты показали, что максимальная разница в выходных сигналах зонда ННК-Т между известняком и доломитом составила 8%, а между песчаником и известняком – 5%. Это подтверждает необходимость использования отдельных КПФ для каждого типа пород или введения дополнительных поправочных коэффициентов.

Таким образом, разработанная структурная схема измерительной системы позволяет проводить точные измерения коэффициента пористости с учётом влияния концентрации NaCl, что повышает надёжность геофизических исследований скважин.

Нам необходимо калибровать и совершать поверки в реальных, а не в идеализированных условиях. То есть однородная среда по определению не должна быть. Теперь необходимо

оформить требование к конструкции эталонов:

- неоднородная среда;
- возможность калибровки при разных диаметрах скважины;
- возможность калибровки при разных концентрациях NaCl;
- эталоны с различными значениями коэффициента пористости;
- эталоны с различным минералогическим составом.

В данной работе будут использованы эталоны для карбонатного разреза-известняк, однако в дальнейшее время рекомендуется создать дополнительно эталоны для песчаника и доломита. В сумме получится 27 эталонов, однако это необходимо для повышения точности.

Водный раствор хлористого натрия в скважине с концентрацией 0, 50, 150 (или 200) г/л можно менять в процессе калибровки.

Для калибровки аппаратуры НК для условий другого минералогического состава (песчаных и доломитовых горных пород) необходимы еще два таких же комплекта из 9 эталонов. Всего требуется 27 эталонов.

Таким образом, используя данный комплект эталонов пористости, можно построить 9 КПФ Кп для трех значений диаметра скважины и трех водонасыщенных песчаных, кальцитовых и доломитовых пластов при любом соотношении концентрации хлора в пласте и в скважине.

Для повышения точности измерений коэффициента пористости с учётом влияния концентрации хлористого натрия была разработана калибровочно-поправочная функция (КПФ). Методика её построения основана на использовании полинома второй степени, который учитывает зависимость показаний зонда ННК-Т от концентрации NaCl в пласте.

Для начала нам необходимо произвести замеры нашего прибора при помощи комплекта эталонов с разными Кп и минерализацией. Стоит отметить, что нас интересуют не только показания ННК-Т, но и выходной сигнал электрического зонда, который может быть настроен на определение концентрации NaCl в пласте.

Таблица 1. Исходные данные

Эталонные значения $K_п$, %	Эталонные значения концентрации NaCl в пласте, г/л	Выходной сигнал зонда концентрации NaCl в пласте (X), В	Относительный выходной сигнал зонда ННК-Т (Y)
1,0±0,2	0	0	0,15
	50	5	0,152
	150	15	0,153
15,2±0,2	0	0	0,35
	50	5	0,37
	150	15	0,38
35,2±0,2	0	0	0,70
	50	5	0,75
	150	15	0,78

КПФ была представлена в виде полинома второй степени, который учитывает зависимость коэффициента пористости от выходных сигналов зондов:

$$K_{по} = A+B\cdot\alpha+C\cdot\alpha^2+D\cdot C_п+F\cdot C_п^2+G\cdot\alpha\cdot C_п+ P\cdot C_с+V\cdot C_с^2+Q\cdot\alpha\cdot C_с+ W\cdot\alpha\cdot C_п\cdot C_с,$$

где α – относительный выходной сигнал зонда ННК-Т; $C_п$ – концентрации хлористого натрия в пласте; A, B, C, D, F, G, P, V, Q, W – коэффициенты, определяемые в процессе калибровки.

Стоит отметить, что эталонов у нас 9, а соответственно и 9 уравнений, а коэффициентов 7. Путем преобразования в матричную форму и нахождения определителя результирующей матрицы и дополнительных определителей мы находим коэффициенты и подставляем в КПФ. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты измерений с использованием КПФ

Поверка №	Измеренное значение	Значение Кп по эталону, %	Допустимая абсолютная погрешность, %	Фактическая погрешность, %
1	1,060979817	1	0,2	0,06098
2	0,836315223	1	0,2	0,163685
3	1,092951537	1	0,2	0,092952
4	15,18288211	15,2	0,2	0,017118
5	15,34861322	15,2	0,2	0,148613
6	15,08880717	15,2	0,2	0,111193
7	35,15605328	35,2	0,2	0,043947
8	35,21507156	35,2	0,2	0,015072
9	35,21824129	35,2	0,2	0,018241

Как видно из таблицы фактическая погрешность при каждой из поверок меньше допустимой погрешности.

Заключение. В результате проведенных исследований и экспериментов была получена калибровочно-поправочная функция для метода ННК-Т, которая позволяет определять коэффициент пористости учитывая хлоросодержание в пласте. Для этого необходимо в зонд ННК-Т дополнительно установить зонд УЭС, который должен быть настроен на определение хлоросодержания через петрофизические зависимости.

Рекомендуется в дальнейшем усложнить вид КПФ для учитывания влияния хлоросодержания не только в пласте, но и в скважине при помощи разноглубинных зондов УЭС и петрофизического обеспечения.

Проверка точности КПФ на контрольных эталонах показала, что фактическая погрешность измерений не превышает допустимых 0,2%. Это подтверждает надёжность разработанной методики и её пригодность для практического применения. Полином второй степени, выбранный в качестве математической модели КПФ, обеспечил оптимальный баланс между точностью и вычислительной простотой, что важно для оперативной обработки данных в полевых условиях.

Внедрение разработанной КПФ в практику геофизических исследований скважин позволит снизить погрешность определения коэффициента пористости, что положительно скажется на оценке запасов углеводородов и эффективности разработки месторождений. Таким образом, предложенная методика является важным шагом в совершенствовании нейтронного каротажа и повышении достоверности геофизических данных.

Библиографический список

1. Лобанков В.М. Основы проектирования геофизических измерительных систем: учебное пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2023. – 185 с.

2. Лобанков В.М. Основы метрологии геофизических измерений: учебное пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2013. – 14 с.

3. Лобанков В.М. Геофизика в нефтегазовом деле: учебное пособие. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2021. – 120 с.

4. Горбачев Ю.И. Геофизические исследования скважин: учебник для вузов. – М.: Недра, 1990. – 368 с.

5. Мухаметзянов В.А. Проблемы измерений коэффициента общей пористости пластов аппаратурой нейтронного каротажа в Республике Башкортостан / В.А. Мухаметзянов, А.С. Гайнулин // Процессы в геосредах. – 2024. – № 2(40). – С. 2470-2476. – EDN AJMXYO.

6. Мухаметзянов В.А. Повышение достоверности измерений коэффициента общей пористости аппаратурой стационарного нейтронного каротажа / В.А. Мухаметзянов // Процессы в геосредах. – 2024. – № 4(42). – С. 2748-2753. – EDN IKLESM.

7. Мухаметзянов В.А. Методология прямых измерений как источник инноваций геофизического предприятия / В.А. Мухаметзянов, С.А. Петрова // Human Progress. – 2024. – Т. 10, № 9. – DOI 10.46320/2073-4506-2024-9a-3. – EDN NZEYMP.

8. Мухаметзянов В.А. Инновационная деятельность геофизического предприятия / В.А. Мухаметзянов, В.М. Лобанков // Московский экономический журнал. – 2023. – Т. 8, № 11. – DOI 10.55186/2413046X_2023_8_11_594. – EDN TZXIBO.

THE NEED TO USE A CALIBRATION AND CORRECTION FUNCTION FOR NEUTRON LOGGING EQUIPMENT WITH AN NOC-T PROBE

N.E. Frolov, *Student*
L.I. Gimazieva, *Student*
Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)

Abstract. *This article presents the results of developing a calibration-correction function (CCF) for neutron logging equipment with the NNK-T probe, designed to determine the porosity coefficient of water-saturated rocks. Special attention is paid to accounting for the influence of sodium chloride concentration in the formation on the measurement accuracy. An analysis of measured and influencing quantities was conducted, the design of standards was justified, and a structural diagram of the measuring system was developed. The CCF was constructed as a second-degree polynomial, and its accuracy was verified. The research results allow for improving the accuracy of determining the porosity coefficient under real well conditions.*

Keywords: *neutron logging, porosity coefficient, chlorine content, calibration-correction function, standards, structural diagram.*