

*На правах рукописи*



**Алхашман Валид Халед**

**МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ПОРИСТОСТИ  
ПЛАСТОВ-КОЛЛЕКТОРОВ АППАРАТУРОЙ НЕЙТРОННОГО  
КАРОТАЖА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ХЛОРА**

Специальность 1.6.9 – Геофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ).

Научный руководитель: **Лобанков Валерий Михайлович**,  
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО  
«Уфимский государственный нефтяной технический  
университет», кафедра «Геофизические методы  
исследований», профессор

Официальные оппоненты: **Гильманова Расима Хамбаловна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ООО НПО «Нефтегазтехнология», директор.

**Даниленко Виталий Никифорович** – кандидат  
технических наук, АО Научно-производственная  
фирма «ГИТАС», директор

Ведущая организация: Татарский научно-исследовательский и проектный  
институт нефти (**ТатНИПИнефть**) публичного  
акционерного общества "Татнефть" имени В.Д.Шашина

Защита состоится 17 октября 2024 года в 14.00 часов в зале заседаний  
диссертационного совета 24.2.358.01 на базе федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский  
государственный национальный исследовательский университет».

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Пермский гос-  
ударственный национальный исследовательский университет» и на сайте уни-  
верситета [www.psu.ru](http://www.psu.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2024 г.

Отзывы на диссертацию направлять по адресу: 614990, г. Пермь, ГСП, ул. Бу-  
кирева, 15, ПГНИУ, диссертационный совет Д 24.2.358.01.

Красильникову П.А., [e-mail: dissovet.geol@gmail.com](mailto:dissovet.geol@gmail.com)

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор геолого-минералогических наук, доцент



П.А. Красильников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Нефть и газ – главные энергетические и сырьевые ресурсы России. При оценке их геологических запасов коэффициент пористости пласта ( $K_{п}$ ) является одной из основных измеряемых величин. Прямым методом скважинных измерений  $K_{п}$  является нейтронный каротаж (НК). Обязательным условием таких измерений является наличие калибровочной функции (КФ) в виде зависимости  $K_{п}$  от выходного сигнала аппаратуры НК. Обязательным условием построения КФ является наличие эталонов пористости пород.

В 1981 году в СССР во ВНИИЯГГе, ВНИИнефтепромгеофизике и ВНИИГИСе были созданы первые эталоны пористости в виде государственных стандартных образцов (ГСО) общей пористости кальцитовых пород, пересеченных скважиной диаметром 196 мм, позволяющие реализовать концепцию одной КФ, предложенную западными геофизическими компаниями. В случае отличия условий скважинных измерений от нормальных условий калибровки показания аппаратуры называли «нейтронной пористостью» или «водородосодержанием». Для перехода от «нейтронной пористости» к  $K_{п}$  конкретных пластов интерпретаторам требовались поправочные функции (ПФ) в виде зависимости поправки от влияющей величины для фиксированного значения  $K_{п}$  и конкретной конфигурации зондов в скважине заданного диаметра. Их получали математическим моделированием на основе метода Монте-Карло. В этом случае требовалось огромное количество ПФ для однотипной аппаратуры с одной КФ. Погрешность полученных поправок к показаниям аппаратуры НК не оценивалась.

Поскольку в процессе геофизических исследований в скважинах (ГИС) измеренные аппаратурой НК значения  $K_{п}$  редко совпадали с  $K_{п}$  по керну, то доверие к измерениям аппаратурой НК оставалось низким и геофизики вынуждены были искать *эталон пористости* непосредственно в исследуемой скважине в виде «*опорных пластов*», параметры которых были заранее измерены другими методами. Использование «*опорных пластов*» для построения одной линейной КФ создавало иллюзию высокоточных измерений  $K_{п}$  пластов–коллекторов, выделенных в разрезе исследуемой скважины. В таком случае возникают существенные погрешности из-за разного химического состава выбранных «*опорных пластов*» (пористые глины и плотные карбонаты), замены реальной параболической КФ аппаратуры НК на линейную КФ, а также из-за приписывания ошибочных «*эталонных*» значений  $K_{п}$  для выбранных «*опорных пластов*» и разной степени влияния хлора в разных пластах.

К началу 2000-х наметилась тенденция создания методик измерений  $K_{п}$  аппаратурой НК на основе множества КФ с использованием эталонов пористости применительно к разным геолого-техническим условиям. Созданные в ЦМИ «Урал-Гео», НПФ «Геофизика», АО «Когалымнефтегеофизика», тресте «Сургутнефтегеофизика» и в других компаниях новые эталоны пористости песчаных и кальцитовых пород позволяли строить несколько КФ с нулевой концентрацией хлора в пласте и в скважине. Были построены также эталоны с одним значением концентрации хлористого натрия в пласте 150 г/л для песчаников и 200 г/л – для кальцитов. Они позволяют строить для аппаратуры НК только линейную ПФ в виде зависимости поправки от концентрации хлористого натрия в пласте вместо нелинейной ПФ и только для фиксированных значений  $K_{п}$ , что также вызывает существенные погрешности измерений при других измеренных значениях  $K_{п}$ . Отсутствие эталонов параметров пористых пластов пород, позволяющих воспроизводить разные значения  $K_{п}$  с переменной концентрацией хлористого натрия в пласте и в скважине, не позволяет обеспечить требуемые показатели точности измерений  $K_{п}$  нефтегазовых пластов. Поэтому создание методики скважинных измерений  $K_{п}$  пластов аппаратурой НК на нефтегазовых месторождениях с повышенными показателями точности всегда актуально.

### **Степень разработанности темы**

Методы и средства скважинных измерений  $K_{п}$  пластов-коллекторов на нефтегазовых месторождениях создавались многими учеными, включая Ф.А. Алексеева, Я.Н. Басина, В.Н., Гильманову Р.Х., Ю.А. Гулина, В.Н. Даниленко, В.Н. Дахнова, И.Л. Дворкина, И.Г. Дядькина, А.В. Золотова, Д.А. Кожевникова, А.Л. Поляченко, Б.М. Понтекорво, Е.М. Филиппова, Ю.С. Шимелевича, L. Allen, S. Antkiw, T. Barber, C. Flaum, S. Locke, H. Sherman и других. Созданием эталонов пористости горных пород для аппаратуры НК и их экспериментальными метрологическими исследованиями занимались А.М. Блюменцев, Ю.А. Гулин, А.В. Золотов, В.П. Иванкин, В.М. Иванов, Г.А. Калистратов, В.М. Лобанков, В.А. Первушин, В.Д. Святохин, В.Г. Цейтлин, В.П. Цирульников, C. Case, D. Ellis, J. Galford, W. Gilchrist, J. Flaum, F. Thays, и др. Была разработана технология изготовления моделей пластов монолитного и насыпного типа и методика их метрологической аттестации, а также методика построения КФ одной переменной в виде полинома второй степени.

Методика выполнения измерений (МВИ)  $K_{п}$  аппаратурой НК совершенствовалась по мере создания и совершенствования эталонов пористости горных пород. Первоначально до конца 20-го столетия в России использовались КФ

для условий кальцитового водонасыщенного пласта с нулевой концентрацией хлора в пласте и в скважине заданного диаметра. В 2002 г. в ОАО «Когалым-нефтегеофизика» были созданы и аттестованы эталоны пористости песчаных водонасыщенных и нефтенасыщенных пород. Впервые была построена МВИ  $K_p$  на основе линейной КФ для песчаного водонасыщенного пласта с концентрацией NaCl 25 г/л. Строилась также линейная ПФ к показаниям аппаратуры НК в песчаном и кальцитовом пласте для коррекции влияния концентрации хлора. Однако такая линейная аппроксимация существенно отличается от реальной нелинейной ПФ. Она может быть использована только для одного или двух фиксированных значений  $K_p$ . Методы измерений  $K_p$  аппаратурой НК с оценкой и учётом совместного влияния концентрации хлора в пласте и в скважине на основе построения калибровочно-поправочных функций (КПФ) не создавались.

**Цель работы** - повышение точности методики выполнения скважинных измерений коэффициента общей пористости пластов, насыщенных минерализованной водой, аппаратурой НК с зондами нейтронного гамма-каротажа (НГК) и нейтрон-нейтронного каротажа по тепловым нейтронам (ННК-Т) на основе создания новых эталонов пористости песчаных пластов и использования КПФ трёх переменных. *Объект исследований* – нейтронный каротаж, *предмет исследований* – методика выполнения измерений  $K_p$  пласта аппаратурой НК с использованием эталонов пористости.

#### **Задачи исследования**

1. Выполнить анализ основных влияющих величин на показания аппаратуры НК при измерениях коэффициента пористости в нефтегазовых скважинах, выявить наиболее существенных из них, разработать и изготовить эталоны пористости песчаного пласта с переменной концентрацией хлористого натрия в поровом пространстве и в скважине, пересекающей пласт чистого песчаника.

2. Обосновать возможность нормирования и использования индивидуальной КПФ трёх переменных для аппаратуры НК вместо одной КФ одной переменной и нескольких ПФ для повышения показателей точности измерений  $K_p$  нефтегазовых пластов.

3. Выполнить экспериментальные исследования аппаратуры НК с зондами НГК и ННК-Т в построенных эталонах пористости чистого песчаного пласта, пересеченном скважиной диаметром  $(216 \pm 1)$  мм и оценить реальные погрешности аппаратуры НК с построенной КПФ.

#### **Научная новизна работы:**

1. Впервые разработан и изготовлен комплекс эталонов пористости песчаного пласта насыпного типа, позволяющих воспроизводить любые значения концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине для значения

$K_{\text{п}}=(35,5\pm 0,2)$  % и фиксированные значения концентрации хлористого натрия  $(50\pm 1)$  г/л для значения  $K_{\text{п}} = (16,7\pm 0,2)$  % и  $(150\pm 2)$  г/л для значения  $K_{\text{п}}=(17,2\pm 0,2)$  %.

2. Разработана новая методика оценки одновременного влияния концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине на показания аппаратуры НК, позволяющая построение для этой аппаратуры калибровочно-поправочных функций трёх переменных.

3. Впервые для аппаратуры НК с зондами НГК и ННК-Т экспериментально построены калибровочно-поправочные функции, позволяющие выполнять измерения коэффициента общей пористости песчаных пластов, пересеченных скважиной диаметром 216 мм, с гарантированными показателями точности при любом сочетании концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании возможности перехода от использования КФ к нормированию и использованию индивидуальных КПФ, получении вида КПФ (с тремя переменными и с 10-ю коэффициентами, найденными путем решения системы уравнений) и получении возможности построения и применения КПФ аппаратуры НК для разных геолого-технических условий исследований нефтегазовых пластов. Это открывает новые возможности повышения точности скважинных измерений  $K_{\text{п}}$  нефтегазовых пластов.

Практическая значимость работы заключается в том, что в результате проведенных исследований в ООО Центр Метрологических Исследований (ЦМИ) «Урал-Гео» созданы и внедрены три новых эталона пористости песчаного пласта, пересеченного скважиной диаметром 216 мм, для оценки влияния концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине на показания аппаратуры НК с любыми зондами и получена возможность построения КПФ аппаратуры НК с любыми зондами для геофизических компаний.

### **Методология и методы исследования**

Методология исследования базируется на использовании теоретического обоснования и выбора вида КПФ с оптимизацией количества неизвестных коэффициентов при построении методики калибровки аппаратуры НК с разными зондами. Сначала выполняется метрологический анализ методов и средств измерений  $K_{\text{п}}$  пластов горных пород аппаратурой НК, выбор существенных влияющих величин, даётся обоснование вида КПФ. Затем проводятся экспериментальные метрологические исследования различных типов аппаратуры НК с использованием созданных эталонов (моделей

водонасыщенного пласта с разной минерализацией). Обработка экспериментальных данных, оценка измеренных значений величин, систематических и случайных погрешностей измерений выполняется статистическими методами на основе новых достижений общей теории измерений.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Комплект эталонов пористости водонасыщенных песчаных пород, пересеченных скважиной диаметром 216 мм, позволяет экспериментально оценивать степень совместного влияния концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине на показания аппаратуры нейтронного каротажа с любыми зондами НГК, ННК-Т и нейтрон-нейтронного каротажа по надтепловым нейтронам (ННК-НТ).

2. Нормирование и использование индивидуальной калибровочно-поправочной функции трёх переменных для аппаратуры нейтронного каротажа вместо одной калибровочной функции одной переменной и нескольких поправочных функций создаёт возможность повышения показателей точности измерений коэффициента общей пористости нефтегазовых пластов.

3. Измерения коэффициента пористости водонасыщенных песчаных пластов могут быть выполнены аппаратурой НК с абсолютной погрешностью менее  $\pm 1,0$  % при любой концентрации хлора в пласте и в скважине по методике, созданной на основе индивидуальных калибровочно-поправочных функций, построенных с использованием новых эталонов пористости, если реальные условия скважинных измерений близки к нормальным условиям.

### **Степень достоверности и апробация работы**

Достоверность полученных результатов исследований подтверждается использованием основных положений современной теории измерений, математической статистики и обработки данных.

Достоверность параметров созданных эталонов подтверждается использованием калиброванных и поверенных средств измерений при их изготовлении.

Основные положения диссертационной работы и результаты исследований докладывались на: научной конференции «Информационные технологии в нефтегазовом сервисе» (г. Уфа, 2017), IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 55-летию кафедры геофизики БашГУ. (г. Уфа, 2019); Всероссийской научно-технической конференции «Трудноизвлекаемые запасы нефти и газа» (г. Уфа, УГНТУ, 2019); IV Международной геолого-геофизической конференции и выставке. ООО «ГеоЕвразия» «Геологоразведка в современных реалиях» (г. Москва, 2021), VII Всероссийской молодежной научно-практической конференции «Геолого-

геофизические методы исследований нефтегазовых пластов». (г. Уфа, 2022).

### **Личный вклад автора в решение поставленных задач**

Диссертация подготовлена на результатах самостоятельных исследований автора. Лично автором выполнен анализ современного состояния метрологического обеспечения аппаратуры НК и величин, влияющих на её показания, а также выбор наиболее существенных из них.

Автором обоснованы основные требования к новым эталонам пористости и внесен основной вклад в разработку и изготовление трёх эталонов пористости. Также проведены экспериментальные исследования по оценке объёма воды, оставшейся в поровом пространстве макетного образца эталона пористости после её слива из порового пространства образца (эталона).

Автором самостоятельно выполнены измерения аппаратурой НК в созданных эталонах пористости, выполнена обработка полученных результатов измерений с использованием теории вероятностей и методов математической статистики.

Теоретически обоснован вид КПФ в виде полинома второй степени в разном сочетании выходного сигнала и влияющих величин.

Самостоятельно выполнена оценка погрешности созданных эталонов пористости в нормальных условиях и аппаратуры НК в рабочих условиях эксплуатации после учёта влияния концентрации хлористого натрия в пласте и в промывочной жидкости при фиксированном диаметре скважины.

### **Публикации**

Основные научные положения и практические результаты диссертационной работы опубликованы в 10 печатных работах, в том числе 4 статьи опубликованы в изданиях перечня ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы, включая 15 рисунков, 22 таблиц и список литературы из 120 наименований, составляет 115 страниц.

### **Благодарность**

Автор признателен и благодарен своему научному руководителю профессору Лобанкову В.М. за научно-техническую помощь в постановке задач исследований, создании эталонов пористости, проведении исследований и общее руководство работой, а также сотрудникам ООО ЦМИ «Урал-Гео» Святохину В.Д., Киямутдинову А.З. и Мамонтову Н.М. за помощь в изготовлении эталонов пористости и выполнении измерений с аппаратурой НК.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первой главе** представлен обзор состояния измерений аппаратурой НК в нефтегазовых скважинах, их метрологического обеспечения и постановка задач исследований.

Первые работы по созданию моделей пластов горных пород для целей калибровки аппаратуры радиоактивного каротажа (РК) были начаты Иванкиным В.П., Гулиным Ю.А. и Золотовым А.В. в конце шестидесятых годов 20-го века. Низкая сходимость и воспроизводимость показаний аппаратуры НК в скважинах и необходимость их стандартизации на основе измерений в контрольных скважинах показана работами Цирульникова В.П.

Работы по созданию эталонов пористости карбонатных пород были начаты в 1979 г. одновременно во ВНИИЯГГе (г. Раменское Московской области) и во ВНИИнефтепромгеофизике (г. Уфа). Были созданы раменские (А.М. Блюменцев, В.Г. Цейтлин), уфимские (В.М. Лобанков) и октябрьские (ВНИИГИС, Ю.А. Гулин, З.З. Ханипов) модели пластов. В 1981 г. они были внесены в Государственный реестр в виде государственных стандартных образцов (ГСО) кальцитовых пород. Главным недостатком этих эталонов пористости насыпного типа была высокая неоднородность воспроизведения  $K_{п}$  из-за несовершенства технологии его приготовления с пропиткой сухого образца снизу. После пропитки вещества водой оставались пузыри воздуха, находящиеся в ловушках твёрдого вещества.

В начале 2000-х В.Д. Святохиным была разработана более совершенная методика приготовления и аттестации эталонов пористости пластов насыпного типа на основе засыпки вещества в воду. По этой методике было изготовлено более 100 эталонов пористости песчаных и кальцитовых пород для построения КФ. Созданных эталонов было недостаточно для построения необходимых КФ и ПФ для типовых рабочих условий измерений.

Зарубежные геофизические компании для калибровки НК также применяют монолитные блоки горных пород и эталоны насыпного типа. В основу разработки методики измерений  $K_{п}$  положена концепция «нейтронной пористости», которая заключалась в построении одной КФ для нормальных условий чистого кальцита ( $\text{CaCO}_3$ ), пересеченного скважиной стандартного диаметра с пресной водой с последующим введением множества поправок. На каротажной диаграмме строилась одна шкала от устья до забоя в единицах «нейтронной пористости». Затем в показания аппаратуры НК требовалось вносить коррекцию по палетке, построенной в виде семейства ПФ по результатам математического моделирования взаимодействия нейтронов с ве-

ществом в неоднородной среде методом Монте-Карло. При этом предполагалось, что на показания НК величины влияют независимо друг от друга, поправки по номограмме вводились последовательно по отдельности. Влияние литологии корректировалось аддитивной поправкой после того, как введены все остальные поправки. Сведения о погрешности этих расчётных поправок в публикациях не представлены. Достоверность измерений  $K_{п}$  по такой методике (по шкалам «нейтронной пористости») в реальных скважинных условиях остаётся проблематичной, поправки взаимозависимо, с изменением одной поправки изменяется другая. Экспериментальное подтверждение достоверности поправок может быть выполнено только при наличии соответствующих эталонов.

Таким образом, требуется разработка более совершенной методики прямых измерений  $K_{п}$  на основе концепции КПФ с построением их семейства в виде функций трех переменных, включая выходной сигнал аппаратуры НК, концентрацию хлористого натрия в пласте и в скважине, и решить задачи, перечисленные во водной части автореферата.

**Во второй главе** приведено доказательство справедливости **первого научного положения**, вынесенного на защиту.

Утверждается, что *«созданный комплект эталонов пористости водонасыщенных песчаных пород, пересеченных скважиной диаметром 216 мм, позволяет экспериментально оценивать степень совместного влияния концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине на показания аппаратуры нейтронного каротажа с любыми зондами НГК, ННК-Т и ННК-НТ».*

Для доказательства этого утверждения необходимо было выполнить следующие работы:

1) обосновать, разработать, изготовить одну экспериментальную модель песчаного пористого пласта с  $K_{п} = (35,5 \pm 0,2) \%$ , пересеченного скважиной диаметром 216 мм, с возможностью изменения концентрации хлора в поровом пространстве и в скважине, и выполнить её метрологические исследования

2) обосновать, разработать, изготовить две экспериментальные модели песчаного пористого пласта с  $K_{п} = 16,7\%$  и с  $K_{п} = 17,2\%$ , пересеченных скважинами диаметром 216 мм, с фиксированными значениями концентрации хлора в порах соответственно 50 г/л и 150 г/л и возможностью изменения концентрации хлора в скважине и выполнить их метрологические исследования;

3) обосновать вид и построить ПФ с использованием созданных эталонов и проверить её пригодность к введению поправок в измеренные значения  $K_{п}$  для аппаратуры НК с зондами НГК и ННК-Т с индивидуальными КФ.

При планировании эксперимента требовалось обосновать параметры со-

здаваемых моделей пласта, пересеченного скважиной. Для обеспечения высокой проницаемости вещества при заполнении и сливе водного раствора NaCl использован кварцевый щебень с размерами фракций от 10 мм до 20 мм с ожидаемым значением  $K_{п}$  в интервале от 33 % до 38 %.

Схема и конструктивные особенности модели показаны на рисунке 1.

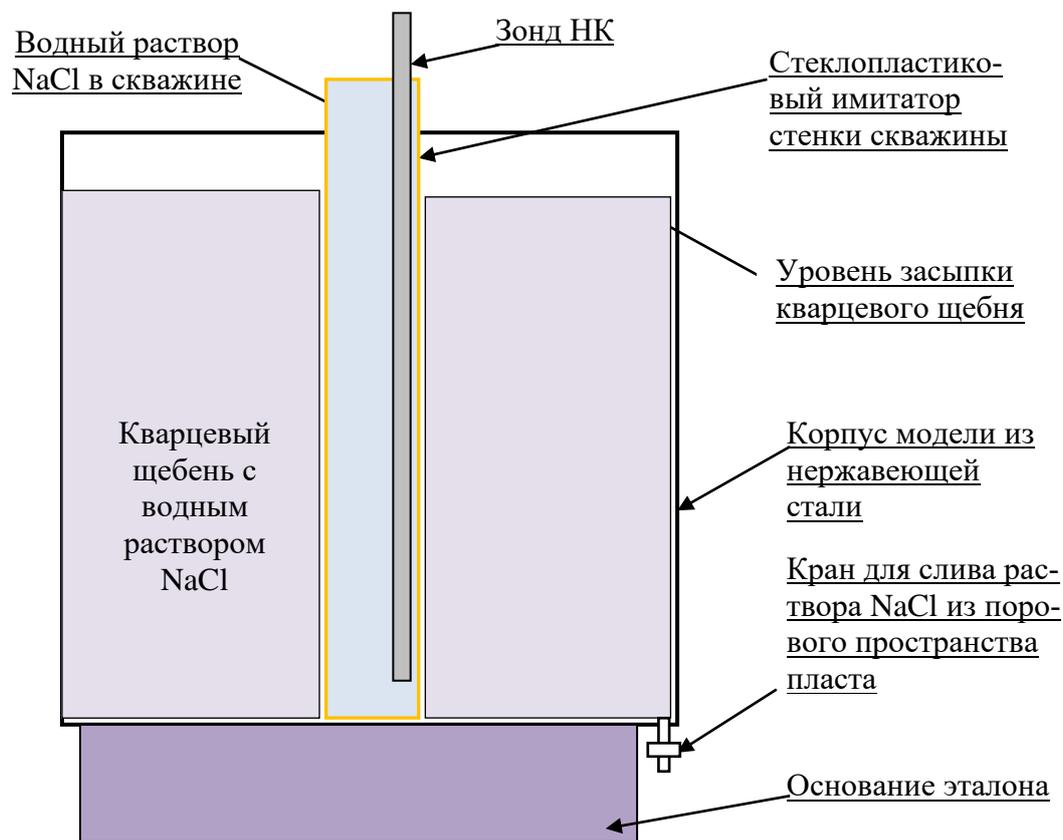


Рисунок 1 - Схема и конструктивные особенности модели пласта  $K_{п} = 35,3\%$  с переменной концентрацией NaCl в пласте и в скважине

Имитатор стенки скважины был изготовлен из стеклоленты на эпоксидной основе в виде цилиндрического стакана высотой 2000 мм с внутренним диаметром  $(216 \pm 1)$  мм и толщиной стенки  $(1,8 \pm 0,2)$  мм и установлен коаксиально на дно корпуса модели диаметром 1450 мм и высотой 1600 мм.

Влияния имитатора на показания аппаратуры НК оценивалось выполнением измерений этой аппаратурой в емкости с питьевой водой без имитатора и с имитатором. Разность в показаниях аппаратуры с зондами НК и НК в пересчете на коэффициент пористости не превысила 0,1 %.

Общий объем засыпки  $(1700,00 \pm 0,34)$ . Общая масса засыпанного в корпус щебня до уровня контрольной отметки  $(2901 \pm 7)$  кг. Общий объем воды в поровом пространстве модели равен  $(600,5 \pm 1,2)$  литров. Воспроизводимое истинное значение  $K_{п}$  находится в интервале  $(35,5 \pm 0,2)$  % при вероятности более 0,997.

На цилиндрической модели пласта объемом 20 л экспериментально установлено, что в двух фракционном эталоне пористости после слива воды в поровом пространстве остаётся до 25% воды, что не допустимо. Поэтому нами созданы два отдельных эталона с  $K_{п}$  около 15 % с фиксированным значением концентрацией хлористого натрия 50 г/л и 150 г/л. Конструктивно эти эталоны отличаются от эталона, показанного на рисунке 1, только отсутствием сливного крана. В результате метрологической аттестации установлено, что эталон № 2 воспроизводит  $K_{п} = (16,7 \pm 0,2) \%$  и эталон № 3:  $K_{п} = (17,2 \pm 0,2) \%$  при вероятности 0,997.

На рисунке 2 представлено семейство ПФ для аппаратуры ПРКЛ-73 с зондом НГК при разном сочетании концентрации хлора в пласте и скважине эталона № 1 с  $K_{п} = 35,3\%$ .

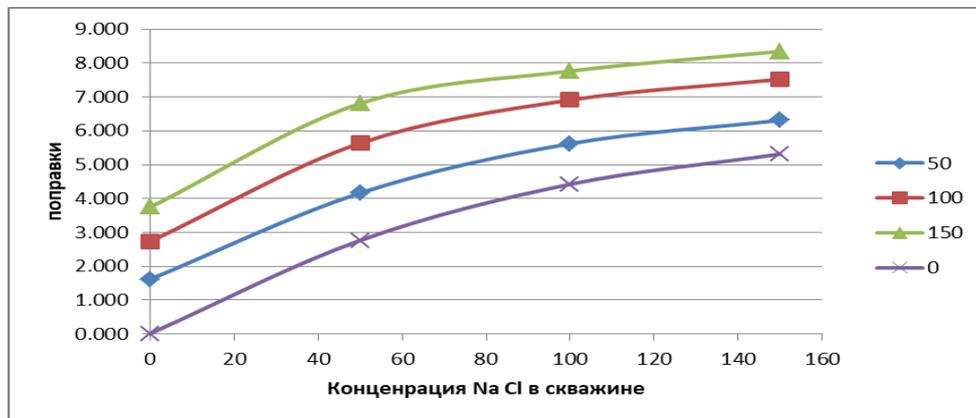


Рисунок 2 - Графики зависимости поправки к показаниям аппаратуры ПРКЛ-73 с зондом НГК от концентрации NaCl в скважине при разной концентрации NaCl в пласте с  $K_{п} = 35,5 \%$

Из графика на рисунке 2 видно, что для зонда НГК характерно присутствие хлора занижает измеренные значения  $K_{п}$ .

В аналитическом виде это семейство ПФ может быть представлено функцией двух переменных  $\theta(C_{п}, C_{с})$

$$\theta(C_{п}, C_{с}) = 31,37 \cdot C_{п} - 45,68 \cdot (C_{п})^2 + 66,166 \cdot C_{с} - 244,58 \cdot (C_{с})^2.$$

На рисунке 3 представлено семейство ПФ аппаратуры РК5 76 с зондом ННК-Т.

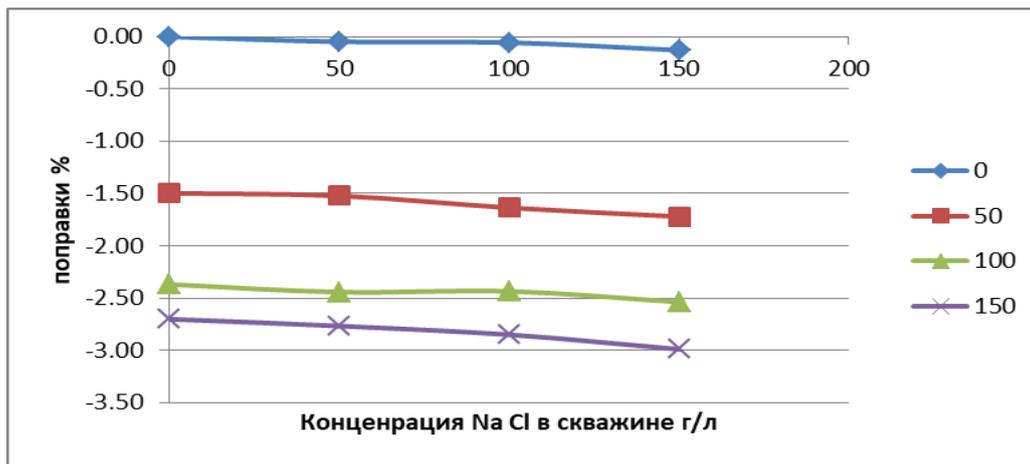


Рисунок 3 - Графики зависимости поправки к показаниям аппаратуры РК5-76 от концентрации NaCl в скважине при разной концентрации NaCl в песчаном пласте с  $K_{п} = 35,5 \%$

Погрешностью измерений влияющих величин (концентрации хлора в пласте и скважине) и выходного сигнала можно пренебречь. Тогда за оценку погрешности аппаратуры с вновь построенной КФ принимается максимальная из погрешностей эталонов. Если подставить в построенную ПФ исходные концентрации хлористого натрия в пласте и в скважине, то получим значения поправок, близкие к действительным значениям. Максимальные отклонения не превышают  $\pm 0,44 \%$ , что является хорошим показателем для выбранной аппроксимации ПФ по экспериментальным данным.

Из графика на рисунке 3 видно, что для зонда ННК-Т характерно завышение измеренных значений  $K_{п}$ . Причем, влияние аномальных свойств хлора сильно меняет показания аппаратуры в области малой концентрации как в пласте, так и в скважине. При повышении концентрации хлора в пласте и скважине ПФ выполаживаются и асимптотически приближаются к своей константе в зависимости от концентрации хлора в пласте. Завышение показаний аппаратуры происходит в результате того, что относительный выходной сигнал возрастает из-за уменьшения частоты следования импульсов на дальнем детекторе, так как тепловые нейтроны поглощаются хлором, не попадая в дальний счетчик, в то время как их регистрация ближним детектором продолжается.

В аналитическом виде это семейство ПФ аппаратуры РК5-76 может быть представлено как функция двух переменных  $\theta(C_{п}, C_{с})$

$$\theta(C_{п}, C_{с}) = -35,4 \cdot C_{п} + 114,4 \cdot C_{п}^2 - 0,39 \cdot C_{с} - 5,7 \cdot C_{с}^2$$

Максимальные отклонения расчетных поправок по ПФ от экспериментальных значений также не превышают  $0,06 \%$ .

Таким образом, экспериментально построенные ПФ для аппаратуры НК

доказывают справедливость первого положения, вынесенного на защиту.

**В третьей главе** приведено доказательство справедливости **второго положения, вынесенного на защиту.**

Утверждается, что *«нормирование и использование индивидуальной калибровочно-поправочной функции трёх переменных для аппаратуры нейтронного каротажа вместо одной калибровочной функции одной переменной и нескольких поправочных функций создаёт возможность повышения показателей точности измерений коэффициента общей пористости нефтегазовых пластов».*

Для доказательства данного положения использованы результаты анализа источников погрешности измерений  $K_{\text{п}}$  нефтегазовых пластов, возникающих при использовании аппаратуры НК на базе КФ и ПФ.

Если нормирована одна КФ для фиксированных значений влияющих величин, то их влияние на показания аппаратуры НК могут быть учтены путем введения ранее оцененных аддитивных или мультипликативных поправок (во всём диапазоне изменений влияющей величины) или поправок, полученных через ПФ. Сами аддитивные и мультипликативные поправки получают с большой погрешностью из-за их осреднения в пределах области влияния влияющих величин.

ПФ обычно бывают разные для разных значений измеряемой величины –  $K_{\text{п}}$ . Поэтому требуется несколько ПФ одной и той же влияющей величины для разных фиксированных значений измеряемой величины. Если измеренное значение не совпадает со значением, принятым в ПФ, то интерпретатор вынужден выполнить интерполяцию оценки поправки в пространстве между соседними ПФ, что вызывает появление неконтролируемых погрешностей интерполяции.

Если влияющих величин две или более двух, то поправки могут быть разными не только при разных значениях измеряемой величины, но и при разных значениях другой влияющей величины, что также приводит к возникновению неконтролируемых погрешностей измерений  $K_{\text{п}}$ . Например, поправки за влияние концентрации хлора в пласте и в скважине будет разным для разных значений диаметра скважины и разной концентрации глины в промывочной жидкости.

Для того чтобы объединить КФ с одной или несколькими ПФ в единую КПФ, необходима возможность технической реализации эталонов, позволяющих воспроизводить одновременно измеряемую величину и одну или несколько влияющих величин. В этом случае экспериментально оцененные влияния на показания аппаратуры НК учитываются через непрерывную функцию выходного сигнала и влияющих величин, в которой учитывается взаимное влияние этих

величин и отсутствуют погрешности от какой-либо аппроксимации величин.

Таким образом, переход от концепции ПФ к концепции КПФ является одним из путей повышения показателей точности прямых скважинных измерений коэффициента пористости пластов аппаратурой НК.

**В четвёртой главе** приведено доказательство справедливости **третьего положения, вынесенного на защиту.**

*Утверждается, что «измерения коэффициента пористости водонасыщенных песчаных пластов могут быть выполнены аппаратурой НК с абсолютной погрешностью менее  $\pm 1,0$  % при любой концентрации хлора в пласте и в скважине по методике, созданной на основе индивидуальных калибровочно-поправочных функций, построенных с использованием новых эталонов пористости, если реальные условия скважинных измерений близки к нормальным условиям»*

Для доказательства данного утверждения необходимо было выполнить следующие работы:

1) на основе измерений во всех созданных эталонах пористости аппаратурой НК обосновать вид и построить КПФ с учетом влияния концентрации хлористого натрия в порах и в скважине; оценить погрешности аппроксимации выбранной КПФ путем подстановки в неё исходных экспериментальных данных;

2) оценить погрешности аппаратуры НК с построенной КПФ и с обычной КФ и сравнить их между собой;

3) показать, что оцененные абсолютные погрешности измерений  $K_{п}$  аппаратурой НК с использованием КПФ в рабочих условиях, близких к условиям калибровки, могут быть менее 1,0 %.

В России в качестве альтернативы концепции «нейтронной пористости» с одной стандартной КФ развивается концепция множества КФ одной переменной для типовых нормальных условий измерений  $K_{п}$ . В разрезе скважины выделяются пласты с параметрами, соответствующими типовым нормальным условиям, для которых имеется КФ. В этом случае каротажная кривая по всему разрезу регистрируется не в единицах измеряемой величины, а в единицах выходного сигнала аппаратуры НК. Однако для условий минерализованного пласта и минерализованной промывочной жидкости требуется большое количество КФ одной переменной.

Поскольку зависимость показаний аппаратуры НК от измеряемой величины ( $K_{п}$ ) и от влияющих величин ( $C_{Cl-п}$  и  $C_{Cl-пж}$ ) является нелинейной, то КПФ может быть описана полиномом второй степени в виде функции  $K_{п}$  от трех переменных: относительного выходного сигнала  $\alpha$ ; концентрации хлористого

натрия в пласте  $C_{Cl-п}$ ; концентрации хлористого натрия в промывочной жидкости  $C_{Cl-пж}$ .

Для построения КПФ для аппаратуры НК были дополнительно созданы два новых эталона, воспроизводящих коэффициент пористости чистых песчанников около 15 % с двумя разными значениями концентрации хлористого натрия в пласте (50 и 150 г/л) с возможностью воспроизведения переменной концентрации хлористого натрия в скважине (0, 50, 100, 150 и 200 г/л).

Если концентрация хлористого натрия в пласте и скважине равна нулю, то для водонасыщенного неглинистого песчаника, пересеченного скважиной диаметром 216 мм, КФ аппаратуры НК имеет стандартный вид полинома второй степени – зависимость  $K_{по}$  от относительного выходного сигнала  $\alpha$ .

$$K_{по} = A + B \alpha + C \alpha^2, \quad (1)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – коэффициенты.

Если концентрация хлористого натрия в пласте ( $C_{п}$ ) не равна нулю, то для водонасыщенного неглинистого песчаника, пересеченного скважиной диаметром 216 мм, КПФ может быть представлена в виде функции двух переменных:

$$K_{по} = A + B \cdot \alpha + C \cdot \alpha^2 + D \cdot C_{п} + F \cdot C_{п}^2 + G \cdot \alpha \cdot C_{п}, \quad (2)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $F$  и  $G$  – коэффициенты.

Если концентрация хлористого натрия в пласте ( $C_{п}$ ) и в скважине ( $C_{с}$ ) не равны нулю, то для того же песчаника КПФ может быть представлена в следующем виде:

$$K_{по} = A + B \cdot \alpha + C \cdot \alpha^2 + D \cdot C_{п} + F \cdot C_{п}^2 + G \cdot \alpha \cdot C_{п} + P \cdot C_{с} + V \cdot C_{с}^2 + Q \cdot \alpha \cdot C_{с} + W \cdot \alpha \cdot C_{п} \cdot C_{с}, \quad (3)$$

где  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$ ,  $F$ ,  $G$ ,  $P$ ,  $V$ ,  $Q$  и  $W$  – коэффициенты.

Построение КФ и КПФ заключается в нахождении их коэффициентов (от  $A$  до  $W$ ). Обычно каждый эталон пористости воспроизводит только по одному значению измеряемой величины и каждой из влияющих величин в различном их сочетании. В каждом из эталонов для каждого сочетания величин фиксируют один относительный выходной сигнал аппаратуры НК. Таким образом, формируется система уравнений, решением которой являются искомые коэффициенты КФ или КПФ. Достоинством методики измерений  $K_{по}$  по показаниям НК с использованием КПФ на основе эталонов единиц измеряемых и влияющих величин является учет взаимного влияния величин на показания аппаратуры НК и получение возможности измерений  $K_{по}$  с требуемой точностью при любых возможных значениях влияющих величин.

По экспериментальным данным, использованным ранее при построении ПФ и приведенным в главе 2, была построена следующая КПФ для аппаратуры ПРКЛ-73:

$$K_{\Pi} = -11 + 74,12 \cdot \alpha - 16,68 \cdot \alpha^2 - 87,47 C_{\Pi} + 265,7 C_{\Pi}^2 + 79,2 \cdot \alpha \cdot C_{\Pi} - 4,108 \cdot C_c - 122,5 \cdot C_c^2 + 112 \cdot \alpha \cdot C_c - 51,3 \cdot \alpha \cdot C_{\Pi} \cdot C_c \quad (4)$$

Максимальная погрешность измерений  $K_{\Pi}$  от аппроксимации экспериментальных данных с помощью КПФ в виде полинома второй степени с 10-ю коэффициентами не превысила  $\pm 0,8 \%$ .

КПФ с оценкой совместного влияния концентрации хлористого натрия в песчаном пласте и в скважине можно представить в другом виде:

$$K_{\text{оп}} = a + (b + c \cdot C_{\text{Cl-п}} + d \cdot C_{\text{Cl-пж}} + q \cdot C_{\text{Cl-п}} \cdot C_{\text{Cl-пж}}) \cdot \alpha + (k + m \cdot C_{\text{Cl-п}} + n \cdot C_{\text{Cl-пж}} + l \cdot C_{\text{Cl-п}} \cdot C_{\text{Cl-пж}}) \cdot \alpha^2 \quad (5)$$

Если подставить в уравнение (5) те же исходные экспериментальные данные и решить систему - уравнений с 9-тью неизвестными  $a, b, c, d, q, k, m, n, l$ , то для аппаратуры ПРКЛ-73 получим другой вид КПФ:

$$K_{\Pi} = -10,26 + (69,2 - 54,71 \cdot C_{\Pi} - 55,42 \cdot C_c + 107,53 \cdot C_{\Pi} \cdot C_c) \cdot \alpha + (-15,54 + 122,59 \cdot C_{\Pi} + 211,84 \cdot C_c - 256,28 \cdot C_{\Pi} \cdot C_c) \cdot \alpha^2 \quad (6)$$

В этом случае максимальная абсолютная погрешность от выбранной аппроксимации КПФ не более  $\pm 1,4 \%$ . Следовательно, аппаратура НК с КПФ, выраженной формулой (4), более точно описывает КПФ по экспериментальным данным, чем КПФ по формуле (6).

Для современной аппаратуры НК допустимая абсолютная погрешность в заданных нормальных условиях не должна превышать

$$\Delta_d = \pm(0,9 + 0,02 \cdot K_{\Pi})\%.$$

Для измеренного значения  $K_{\text{оп}} = 15 \%$  абсолютная допустимая погрешность  $\Delta_d = \pm 1,2 \%$ , а для измеренного значения  $K_{\text{оп}} = 35 \%$  уже  $\Delta_d = \pm 1,6 \%$ .

Видно, что при представлении результата измерений использовать допустимые погрешности аппаратуры НК показатели точности оказываются уже весьма грубыми даже в условиях отсутствия хлора в пласте и в скважине.

Если при измерениях в песчаном пласте с  $K_{\Pi} = 35 \%$  аппаратурой ПРКЛ-73 с зондом НК не будут введены поправки за влияние хлора в пласте и в скважине, то максимальная абсолютная погрешность может достигать  $\pm 15,6 \%$ , а для аппаратуры РК5-76 по каналу НК-Т максимальная абсолютная погрешность может достигать  $\pm 4,8 \%$  при доверительной вероятности более 0,997.

В случае, когда для аппаратуры НК построена КПФ в виде (3) и скважин-

ные условия измерений будут близки к условиям калибровки, то общая погрешность измерений будет складываться из максимальной погрешности аппроксимации КПФ ( $\pm 0,8$ ) и погрешности использованных эталонов пористости ( $\pm 0,2$  %). Если найти арифметическую сумму этих абсолютных погрешностей, то для аппаратуры ПРКЛ-73 и РК5-76, то оценка погрешности этой аппаратуры в самом худшем случае не превысит  $\pm 1,0$  % с вероятностью 1.

Таким образом, возможность экспериментального построения КПФ трёх переменных для аппаратуры НК для различных геолого-технических условий на основе созданного комплекта эталонов позволяет выполнять скважинные измерения  $K_{оп}$  с погрешностью значительно меньшей, чем нормированная допускаемая погрешность аппаратуры с КФ одной переменной, и стать менее  $\pm 1,0$  % с вероятностью 1. Следовательно, справедливость второго научного положения считаю доказанным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных автором исследований получены следующие основные результаты и выводы:

1. Выполнен анализ основных влияющих величин на показания аппаратуры НК при измерениях коэффициента пористости в нефтегазовых скважинах, выявить наиболее существенные из них. Установлено, что принятая в настоящее время концепция одной основной калибровочной функции аппаратуры НК для нормальных условий измерений в чистом водонасыщенном кальцитовом пласте в виде зависимости  $K_{п}$  от относительного выходного сигнала с последующим поочередным введением поправок для типовых влияющих величин не позволяет измерять  $K_{п}$  с требуемой точностью. Поправки к показаниям аппаратуры НК от различных влияющих величин взаимозависимы. Они имеют разные значения при разном сочетании других влияющих величин при одном и том же значении измеряемой величины. Разработаны и изготовлены эталоны пористости песчаного пласта с переменной концентрацией хлористого натрия в поровом пространстве и в скважине диаметром  $(216 \pm 1)$  мм, пересекающей пласт чистого песчаника. Первый эталон воспроизводит  $K_{оп} = (35,3 \pm 0,2)$  % с переменной концентрацией хлористого натрия в пласте и скважине. Второй эталон воспроизводит  $K_{п} = (16,7 \pm 0,2)$  % с переменной концентрацией хлористого натрия в скважине с постоянной концентрацией хлористого натрия в пласте  $(50 \pm 1)$  г/л и третий эталон с  $K_{п} = (17,2 \pm 0,2)$  % и с концентрацией хлористого натрия в пласте  $(150 \pm 2)$  г/л.

2. Обоснована возможность нормирования и использования индивидуальной КПФ трёх переменных для аппаратуры НК вместо одной КФ одной переменной и нескольких ПФ для повышения показателей точности измерений  $K_{п}$  нефтегазовых пластов. Установлено, что методология КПФ позволяет получать измеренные значения коэффициента пористости во всем нормированном диапазоне измеряемой величины и влияющих величин (концентрации хлористого натрия в диапазоне от 0 до 200 г/л). Показана возможность построения семейства КПФ для аппаратуры НК с различными зондами, что позволит существенно уменьшить погрешности измерений  $K_{п}$  на нефтегазовых месторождениях для значительной части геолого-технических условий измерений, для которых могут быть созданы соответствующие эталоны пористости.

3. Выполнены экспериментальные исследования аппаратуры НК с зондами НГК и ННК-Т в построенных эталонах пористости чистого песчаного пласта, пересеченного скважиной. Экспериментально установлено, что влияние хлора в пласте и в скважине на показания аппаратуры НК с зондами ННК-Т и НГК велико. Показано, что при измерении  $K_{п}$  аппаратурой РК5-76 с зондом ННК-Т наблюдается завышение измеренных значений  $K_{п}$  при увеличении концентрации хлорида натрия в скважине и пласте. При концентрации NaCl в скважине до 150 г/л показания могут быть завышены до 0,4 %. При добавлении раствора NaCl такой же концентрации в поровое пространство пласта показания уже возрастают до 3 %. При измерении  $K_{оп}$  аппаратурой ПРКЛ-73 с зондом НГК наблюдается занижение измеренных значений  $K_{оп}$  при увеличении концентрации NaCl в скважине до 150 г/л на 5 %. При добавлении такой же концентрации NaCl в пласт занижение показаний наблюдается до 8,5 %. Оценены реальные погрешности аппаратуры НК с построенной КПФ трёх переменных. Показано, что реальная абсолютная погрешность измерений коэффициента пористости песчаных водонасыщенных пластов в диапазоне измерений от 10 до 40 % с любой концентрацией хлористого натрия в пласте и в скважине от 0 до 150 г/л не превышает  $\pm 1,0$  %, если реальные условия скважинных измерений несущественно отличаются от нормальных условий калибровки аппаратуры НК с использованием новых эталонов.

***Список работ, опубликованных автором по теме диссертации  
в изданиях, рекомендованных ВАК***

1. Алхашман, В.Х. Влияние концентрации хлористого натрия в песчаном пласте и в скважине на показания аппаратуры нейтронного каротажа / В.Х. Алхашман, В.М. Лобанков // Нефтегазовое дело. – 2020. – Т 18. – № 1. – С. 6-14. (личный вклад автора 60%).

2. Алхашман, В.Х. Проблемы импульсного нейтронного каротажа при геофизическом контроле разработки месторождений / В.Х. Алхашман, В.М. Лобанков // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. – № 1. – С. 9-17. (личный вклад автора 70%).

3. Лобанков, В.М. Метрологический сервис скважинной геофизической аппаратуры при оказании измерительных услуг / В.М. Лобанков, В.Х. Алхашман // НТВ «Каротажник». – 2021. – № 3(309). – С. 127-138. (личный вклад автора 20%).

4. Лобанков В.М. Количественная интерпретация данных нейтронного каротажа как измерительный процесс / В.М. Лобанков, В.Х. Алхашман // НТВ «Каротажник». – 2023. – № 1(320). – С. 88-94. (личный вклад автора 50%).

### *в других изданиях*

5. Алхашман, В.Х. Влияние хлора в песчаном пласте и скважине на показания аппаратуры нейтронного каротажа / В.Х. Алхашман, В.М. Лобанков // Тезисы докладов на 28-й научной конференции им. Лаптева В.В. «Новая техника и технологии для трудноизвлекаемых углеводородов» : в рамках Российского нефтегазохимического форума и XXX Международной специализированной выставки «Газ. Нефть. Технологии-2022. – Уфа : Изд-во ООО «Новтек Бизнес», 2022. – С. 85-88 (личный вклад автора 50%).

6. Лобанков, В.М. Эталоны для скважинных средств измерений параметров пластов в процессе бурения / В.М. Лобанков, В.Х. Алхашман, Д.Н. Аду Уаду // В сборнике трудов IV международной геолого-геофизической конференции и выставки «Геоевразия-2021. Геологоразведка в современных реалиях». –Тверь : ООО «Геоевразия», 2021. – С. 120-123. (личный вклад автора 40%).

7. Алшахман, В.Х. Исследование влияния хлоросодержания в пласте и в скважине на показания аппаратуры НК / В.Х. Алхашман // Тезисы докладов научной конференции «Информационные технологии в нефтегазовом сервисе». Уфа : 2019. – С. 17-18. (личный вклад автора 100%).

8. Алшахман, В.Х. Методика построения КПФ для аппаратуры НК / В.Х. Алхашман // Тезисы докладов научной конференции «Новая техника и технологии для геофизических исследований» : в рамках XVIII Конгресса нефтегазопромышленников России. – Уфа: 2019. – С. 17-18. (личный вклад автора 100%).

9. Алхашман, В.Х. Обоснование калибровочно-поправочных функций для аппаратуры нейтронного каротажа / В.Х. Алхашман, Н.М. Мамонтов // Сборник научных статей по материалам IV всероссийской молодежной научно-практической конференции «Геолого-геофизические исследования нефтегазовых пластов». – Уфа :2019. – С. 98-100. (личный вклад автора 60%).

10. Алхашман, В.Х. Состояние измерений коэффициента пористости горных пород аппаратурой нейтронного каротажа / В.Х. Алхашман, Н.М. Мамонтов // Сборник статей, докладов и выступлений на Всероссийской научно-технической конференции Уфимского государственного нефтяного технического университета «Трудноизвлекаемые запасы нефти и газа». – 2019. – С. 19-20. (личный вклад автора 70%).