УДК 550.31 + 622.276

ПРОМЫСЛОВО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО КОНТРОЛЮ ЗА РАЗРАБОТКОЙ ГАЗОВЫХ И ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ

FIELD GEOPHYSICAL RESEARCH TO CONTROL THE DEVELOPMENT OF GAS AND GAS CONDENSATE DEPOSITS

Слепцов Александр Алексеевич
студент направления подготовки
21.04.01 «Нефтегазовое дело»
профиль «Проектирование и управление
объектами нефтегазовой отрасли»,
Санкт-Петербургский горный университет
императрицы Екатерины II
sleptsov.aa00@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматриваются методы промыслово-геофизических исследований, направленные на контроль за эксплуатацией газовых и газоконденсатных месторождений. На основе анализа различных источников был составлен перечень методов промыслово-геофизических исследований, используемых при контроле за разработкой газовых и газоконденсатных залежей. В данной работе описаны принципы работы, область применения и используемое оборудование для выделенных методов промыслово-геофизических исследований. Актуальность темы связана с необходимостью проведения промыслово-геофизических исследований в различных условиях, которые могут исключать возможность полноценного использования того или иного метода ГИС.

Ключевые слова: промыслово-геофизические исследования по контролю за разработкой; радиоактивный каротаж; акустический каротаж; электромагнитный каротаж; термокаротаж; барометрия; расходометрия; влагометрия (диэлькометрия).

Sleptsov Alexander Alekseevich
Student Training direction
21.04.01 «Oil and gas engineering»
profile «Design and management
of oil and gas industry facilities»,
Empress Catherine II
Saint Petersburg Mining University
sleptsov.aa00@gmail.com

Annotation. This article discusses the methods of field and geophysical research aimed at controlling the operation of gas and gas condensate fields. Based on the analysis of various sources, a list of field and geophysical research methods used in monitoring the development of gas and gas condensate deposits was compiled. This paper describes the principles of operation, the scope of application and the equipment used for the selected methods of field and geophysical research. The relevance of the topic is related to the need to conduct field and geophysical research in various conditions, which may exclude the possibility of full-fledged use of a particular geophysical well research methods.

Keywords: field geophysical research to control development; radioactive logging; acoustic logging; electromagnetic logging; thermal logging; barometry; flow metering; moisture testing (dielkometry).

Перечень методов промыслово-геофизических исследований, используемых при контроле за разработкой газовых и газоконденсатных залежей

В соответствии с рекомендациями методических указаний по комплексированию и последовательности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений, иной нормативно-технической документации, а также учебных и методических пособий по геофизическим методам исследования скважин, рекомендуется использовать виды исследований, перечисленные в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень методов промыслово-геофизических исследований, используемых при контроле за разработкой газовых и газоконденсатных залежей [1–5]

Задача	Применяемый метод
1	2
Определение текущего положения ГВК	– нейтронный каротаж; – импульсный нейтронный каротаж; – ядерный магнитный каротаж; – волновой акустический каротаж; – методы электромагнитного каротажа; – термокаротаж; – барометрия; – перфорация под давлением в предварительно осушенной скважине; – расчётные методы; – испытание пластов с помощью приборов на кабеле; – испытание пластов с помощью инструментов на трубах

Продолжение таблицы 1

1	2
Определение текущей газонасыщенности пластов	– стационарный нейтронный каротаж; – импульсный нейтронный каротаж; – импульсный нейтронный гамма-каротаж; – метод наведенной активности – метод спектрометрии гамм-излучения неупругого рассеяния; – гамма-каротаж по радиогеохимическому эффекту – углеродно-кислородный каротаж; – волновой акустический каротаж; – электромагнитные методы каротажа; – боковой каротаж; – боковое каротажное зондирование; – микробоковой каротаж; – микрокаротажное зондирование; – метод потенциалов собственной поляризации; – электрометрия через обсаженную колонну (типа «CHFR»); – глубинные опробователи на кабеле (типа «MDT-CHDT»); – термометрия высокочувствительная
Определение профиля притока и состава притока	
Определение профиля (интервалов) притока газа	– расходометрия; – термокондуктивная индикация; – термометрия; – шумометрия
Определение дебита (интервального) притока газа	– расходометрия; – расходометрия ультразвуковая
Определение состава интервального притока газа	– барометрия; – диэлькометрия; – устьевые пробы; – гамма-плотнометрия
Определение состава интервального притока газожидкостной смеси, включая её обводнённость	– расходометрия; – барометрия; – диэлькометрия; – термокондуктивная индикация; – шумометрия-спектрометрия; – локация движения вод электромагнитная (спектральная); – глубинные пробы; – гамма-плотнометрия
Определение профиля (интервалов) приёмистости воды / газа	– расходометрия; – термокондуктивная индикация; – термометрия; – шумометрия
Контроль технического состояния скважин	
Определение негерметичностей (в т.ч. перфорации)	– локация муфт; – гамма-гамма дефектометрия; – электромагнитная дефектоскопия; – микрокавернометрия, а также активные способы: – серия гамма-методов с закачкой радиоактивных короткоживущих изотопов; – индукционная резистивиметрия с закачкой меченого вещества; – термометрия с закачкой контрастной по температуре жидкости
Определение наличия цемента в заколонном пространстве	– термометрия после заливки; – гамма-гамма цементометрия; – акустическая цементометрия
Определение содержания и сцепления цемента с колонной и породой	– гамма-гамма цементометрия; – акустическая цементометрия; – широкополосный акустический метод волновой
Определение негерметичностей цементного кольца, создающих условия для заколонных перетоков пластовых флюидов	в динамике: – термометрия; – шумоиндикация; – шумометрия-спектрометрия
Определение интервалов заколонных перетоков и направления и состава межпластовых перетоков	см. методы определения профиля и состава притока

Окончание таблицы 1

1	2
Определение сальников (гидратные пробки, солевые отложения)	– шаблонирование; – микрокавернометрия; – методы оценки притока; – шумоиндикация в динамике
Определение эффективных внутренних диаметров колонн, толщин стенок обсадных труб (включая зоны, подверженные коррозией)	– скважинная профилеметрия; – скважинная магнитоимпульсная дефектоскопия - толщинометрия труб
Определение коррозии	– микрокавернометрия; – электромагнитная дефектоскопия; – гамма-гамма дефектометрия; – скважинный акустический телевизор; – скважинное видео
Определение положения других элементов конструкции	– локация муфт; – микрокавернометрия; – электромагнитная дефектоскопия; – гамма-гамма дефектометрия; – методы оценки притока; – термометрия; – шумоиндикация в динамике
Контроль глубины забоя	– локация муфт; – гамма-каротаж

Стоит обозначить, что основными документами, определяющими составы комплексов исследований скважин на данный момент, являются:

- ГОСТ 32358-2013 Скважины нефтяные и газовые. Геофизические исследования и работы в скважинах. Общие требования;
- РД 153-39.0-109-01. Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений.

В них содержатся рекомендованные виды исследований по различным типам скважин и решаемым задачам. Тем не менее, данные документы не учитывают особенности применения тех или иных методов во всей полноте возможных условий. В связи с чем недропользователи становятся вынуждены, используя накопленный опыт, разрабатывать собственные нормативно-технические документы, учитывающие данные особенности. Помимо этого, стоит отметить, что государственный стандарт достиг возраста более 9 лет, что негативно сказывается на его актуальности, так как за это время в промышленности получили распространение некоторые методы геофизических исследований, не упоминаемые в тексте документа [6, 7]. Обратим особое внимание на них.

Formation Micro-Imager Logs (FMI) – азимутальный электрический микроимиджер, аппаратура компании Schlumberger. Имиджи FMI регистрируются 192-мя электродами на 8 башмаках прибора. При помощи специального контура в пласт направляются токи измерения. Низкочастотная часть регистрируемого сигнала используется для определения петрофизических и литологических характеристик пород, а по высокочастотной составляющей производят детализацию имиджей. Глубина зондирования составляет порядка 76,2 см, что сравнимо с аналогичной характеристикой приборов бокового электрокаротажа.

Dipole Sonic Imager (дипольный акустический имижер) – это кросс-дипольный акустический прибор, работа которого заключается в излучении акустического сигнала посредством двух пар монопольных и ортогональных дипольных источников излучения. За прием отраженного сигнала отвечают восемь матрично расположенных станций гидрофонов. Зонд XMAC фирмы «Baker Atlas» объединяет в себе монопольные и поперечно расположенные дипольные приёмники-передатчики, которые позволяют измерять скорость продольных и поперечных волн, волн Стоунли в условиях рыхлых и низкоскоростных пластов, а также дают возможность выполнять азимутальные измерения анизотропии.

При помощи кросс-дипольного каротажа решаются такие задачи, как прогнозирование направления естественных трещин, определение азимутальной анизотропии изгибно-поперечных волн, пористости, литологии и проницаемости, а также вычисление динамических механических свойств горных пород.

Многозондовый индукционный каротаж (Array Induction Imager Tool) представляет собой метод индукционного каротажа, проводимый с помощью комплекса из 4 или 5 разноглубинных зондов и ведущий непрерывную запись кажущейся проводимости по всем измерительным зондам. Примером

такого прибора может служить 5ИК-45. Многозондовый индукционный каротаж применяется для литологического расчленения и корреляции разрезов скважин и определения характера насыщения коллекторов. Комплексирование данного метода с данными бокового каротажно-геофизического зондирования позволяет оценивать параметры зоны проникновения.

Fast Neutron Cross Section (FNXS) – макросечение рассеяния быстрых нейтронов, параметр, измеряемый при импульсной нейтрон-гамма спектрометрии. Он был предложен для описаний неупругого гамма-излучения для оценки газового пласта. FNXS – это макроскопическое поперечное сечение упругого рассеяния нейтронов с энергией 14 МэВ. Для оценки данного параметра, применяется комплексная аппаратура. Такой подход позволяет четко различать зоны насыщения газом и зоны насыщения нефтью и водой в коллекторах и плотных пропластках. В отличие от стандартного нейтронного каротажа, параметр FNXS не зависит от конкретных химических элементов, что обеспечивает одинаковые значения для твердой матрицы, нефти и воды. Поэтому измерение FNXS не реагирует на пористость в коллекторах, насыщенных нефтью или водой, а только на поры, насыщенные газом.

Зондирование становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) изучает переходные процессов электромагнитного поля, которые возникают в горной породе при изменении тока контролируемого импульсный источника. В процессе полевых работ для источника и приемника обычно используются многоразностные установки с квадратными незаземленными петлями. ЗСБ обеспечивает отличную локализацию и глубину проникновения, а также минимизирует чувствительность к анизотропии среза и поверхностным неоднородностям. Отсутствие гальванического заземления позволяет методу ЗСБ работать в различных природных условиях. Он позволяет определять границы слоев горных пород, а также оценивать коллекторские свойства и насыщение коллекторов.

Как видно из перечисленных примеров, промыслово-геофизических исследований, используемых при контроле за разработкой газовых и газоконденсатных залежей находятся в состоянии постоянного развития и требуют регулярного обновления нормативно-технической документации (НТД), на основании которой происходит принятие решения о применении того или иного метода исследований. Потеря релевантности НТД вследствие устаревания является большой проблемой, вынуждающей недропользователей придавать все большее значение производственному опыту и разработке внутренних НТД. Охарактеризовать подобное явление как однозначно позитивное или негативное невозможно, так как принятие решения о разработке внутренней НТД осуществляется непосредственно предприятием, тем не менее, повсеместное принятие подобных решений является сигналом о том, что государственные стандарты теряют свою актуальность.

Описание методов промыслово-геофизических исследований, используемых при контроле за разработкой газовых и газоконденсатных залежей

Ниже приведено описание физических основ, способов и областей применения перечисленных ранее методов. Методы представлены в укрупнённых группах и указаны в порядке упоминания.

Радиоактивный каротаж

Нейтронный каротаж – это метод геофизических исследований, основанный на облучении скважины и пород нейтронами от стационарного ампульного источника и измерении плотностей потоков надтепловых и тепловых нейтронов и (или) γ-квантов, образующихся в результате ядерных реакций рассеяния и захвата нейтронов [8].

В зависимости от регистрируемого излучения различают:

- нейтронный каротаж по надтепловым нейтронам – ННК-НТ;
- нейтронный каротаж по тепловым нейтронам – ННК-Т;
- нейтронный гамма-каротаж – НГК.

На текущий момент при помощи нейтронных методов чаще всего определяют положение газоводяного контакта (ГВК) [9]. ГВК обычно имеет толщину в несколько метров, а его характер во многом определен капиллярными силами. Уменьшение поровых каналов ведет к росту высоты капиллярного поднятия воды, а рост неоднородности переходной зоны приводит к увеличению толщина ГВК [1].

Положение ГВК определяют по следующим признакам:

- по началу увеличения показаний зондов против слабоглинистых коллекторов в условиях отсутствия или небольшой глубины зоны проникновения;
- по превышению показаний большого зонда над малым – методика двухзондового НК;
- сравнением показаний текущего и фонового измерений (методика временных измерений) при обеспечении идентичности их выполнения (конструкция и заполнение ствола скважины, тип аппаратуры и т.п.).

Нейтронный каротаж выполняется с использованием специализированной аппаратуры как для узконаправленного исследования, так и для комплексного изучения скважин. Один из таких комплексов – КСАТ-РК5-76, представляющий собой современное оборудование для радиоактивного каротажа. Данная техника предназначена для мониторинга разработки нефтяных и газовых месторождений, а также для изучения боковых стволов, пробуриваемых из уже существующих скважин. Ее технические характеристики перечислены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики КСАТ-РК5-76 [10].

Наименование канала		Условное обозначение	Диапазон	Погрешность	Разрешение
Температура внутри модуля, °С		$T_{вн}$	0…+120	± 2	0,1
Водонасыщенная пористость НГК,%		НГК	1–40	± [4,2 + 2,3(40/$K_л$ – 1)]	0,01
Малый зонд Большой зонд	Водонасыщенная пористость ННК, %	ННК	1-40	± [4,2 + 2,3(40/$K_л$ – 1)]	0,01
Локатор муфт, сигнал/шум		ЛМ	> 5/1	–	–
МЭД гамма-излучения, мкР/ч		ГК	1-100	± 10 %	0,01

При помощи КСАТ-РК5-76 регистрируют уровень жидкости и НВК и определяют насыщенность пород пластовыми флюидами. Также с его помощью возможна регистрация гамма-излучения и локализация муфт.

В случаях, когда информация, получаемая от стационарного нейтронного каротажа, является недостаточно информативной или необходимо комплексное решение сразу нескольких задач, специалистами рекомендуется использование импульсного нейтронного каротажа (ИНК) [2]. Методика ИНК заключается в периодическом облучении горных пород быстрыми нейтронами с энергией 14 МэВ при помощи импульсов [11]. Между облучениями измеряют плотность тепловых нейтронов и интенсивность гамма-излучения радиационного захвата.

Посредством анализа зависимости количества зарегистрированных нейтронов или гамма-квантов от времени определяется среднее время жизни тепловых нейтронов. Оно позволяет оценить содержание в горной породе элементов с высоким сечением поглощения нейтронов. ИНК представляет собой более точный, чувствительный и глубокий метод определения содержания хлора в горной породе по сравнению с альтернативными методами нейтронного каротажа.

В качестве примера аппаратуры, используемой для определения ГВК путем ИНК, можно привести прибор импульсного нейтронного каротажа автономный АПРК-ИННК. Зондовая установка прибора содержит два пропорциональных гелиевых счётчика тепловых нейтронов. Для обеспечения подачи нейтронов с энергией 14 МэВ применяется импульсный генератор нейтронов. При частоте генерации нейтронных импульсов в 10 Гц этот генератор обеспечивает выход нейтронов в количестве $0,5 \times 10^8$ нейтронов в секунду.

В область применения подобной аппаратуры входит:

- определение нефтенасыщенности на месторождениях с минерализованными пластовыми водами;
- определение ГВК;
- оценка пористости пород;
- литологическое расчленение разреза;
- определение заколонных перетоков и мест поступления воды.

С целью повышения точности определения положения ГВК могут совместно применяться (комплексироваться) различные виды каротажа. При большой неоднородности пластов по пористости ИННК комплексируется с методом, способным отслеживать эти изменения, например, НГК или ННК [12]. Это позволяет повысить точность определения ГВК за счёт снижения количества «помех». Также для отслеживания изменения положения ГВК во времени применяется сопоставление измерений, зарегистрированных в разное время. На рисунке 1 представлен пример сопоставления различных измерений при определении водонефтяного контакта.

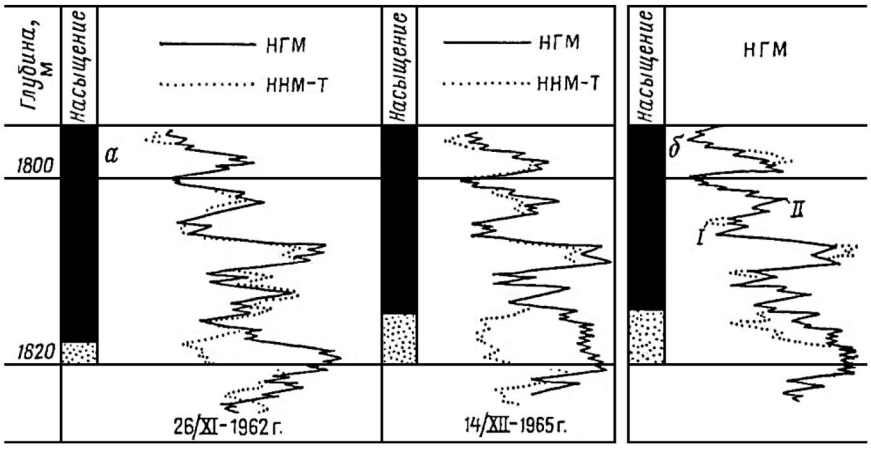

Рисунок 1 – Сравнение:
а) нормированных диаграмм ННК-Т и НГК;
б) диаграмм НГК, полученных в разные временные промежутки (трехлетний интервал)

Так как большинство ГИС проводится в обсаженных скважинах, в качестве основных методов оценки насыщения пластов выступают нейтронные методы. Чаще всего применяются ННК, НГК, ИННК, а также нейтронный активационный метод по кислороду.

Коэффициент газонасыщенности коллектора определяется как отношение объема газа, содержащегося в открытом пустотном пространстве, к общему объему открытых пустот [13].

Метод ядерно-магнитного каротажа (ЯМК) основан на использовании ядерного магнитного резонанса и сигнала свободной прецессии ядер водорода под воздействием магнитных полей [14]. Исследуемая область ЯМК представляет собой цилиндрическую зону, удаленную от стенки скважины на 5-8 см, с толщиной порядка 0,5–1 мм.

Затухание намагниченности регистрируется в виде релаксационной кривой. Начальная амплитуда этой кривой пропорциональна объемному содержанию водорода и отражает число резонирующих ядер. Релаксация ядер водорода в твердой фазе породы уже завершается к моменту начала измерения, поэтому сигнал отражает только содержание флюида (воды, нефти, газа) в поровом пространстве, пересчитанное в пористость по ЯМК. Пористость по этому методу не зависит от литологии породы.

Ядерно-магнитный каротаж в модификации ЯМТК позволяет регистрировать кривые релаксации флюидов пластов и анализировать их спектры, оценивать разнообразие коллекторов по фильтрационным параметрам и выявлять наличие потенциально подвижной нефти. Также, он способен определить структуру разрезов, двухмерное распределение пористости, и проницаемость и эффективную и абсолютную пористость на точечном уровне [15].

Комплексирование с гравитационным и радиоактивным каротажом позволяет ЯМК оценивать содержание битумов и параметров газонасыщенных пластов [16].

Данный метод является современным и регулярно адаптируется под современные требования к аппаратуре каротажа в наиболее новых конфигурациях бурящихся скважин [15, 17].

Метод наведённой активности (МНА) работает за счёт измерения активности искусственных радиоактивных изотопов, которые образуются из стабильных изотопов в результате облучения горных пород потоком нейтронов, гамма-квантов или заряженных частиц [18].

В нём используются реакции взаимодействия нейтронов и горной породы, в результате которых образуются радиоактивные изотопы, которые испускают гамма-излучение при распаде. Измерительный прибор регистрирует искусственно созданное гамма-поле, образующееся при распаде созданных изотопов.

Нейтронное излучение для активации горной породы может быть создано как стационарным, так и импульсным источником. Наведённая радиоактивность горных пород уменьшается во времени по экспоненциальному закону, поэтому зарегистрированная гамма-активность в конкретный временной интервал зависит от числа ядер данного элемента в горной породе, т.е. его концентрации.

Среди спектральных радиоактивных методов наиболее известен импульсный спектрометрический нейтронный гамма-метод, являющийся разновидностью ИНК и основанный на изучении вторичного гамма-излучения неупругого рассеяния быстрых нейтронов.

Спектрометрия гамма-излучения неупругого рассеяния нейтронов использует эффект взаимодействия испускаемых источником быстрых нейтронов с ядрами элементов горных пород [19]. Быстрые нейтроны в результате неупругих столкновений создают жесткое гамма-излучение, по спектру которого можно обнаружить присутствие многих элементов.

При гамма-каротаже повышенное внимание уделяют радиогеохимическому эффекту (РГХЭ). Его суть состоит в насыщении естественными радиоактивными изотопами осолоненного вала в процессе вытеснения нефти водой [20]. При достижении этим валом скважины радиевые соли необратимо адсорбируются на поверхности цементного кольца. В результате этого естественная радиоактивность забоев обводняющихся скважин всегда повышена.

В процессе проведения углеродно-кислородного каротажа исследуется энергетическое и временное распределение плотности потока гамма-излучения, вызванного различными нейтронными реакциями на ядрах породообразующих элементов. Регистрация линий углерода, кислорода и других породообразующих элементов проводится на основе γ-излучения неупругого рассеяния на высоких энергиях и γ-излучения радиационного захвата на низких энергиях [21, 22]. Эти данные помогают определить тип флюида и его содержание в поровом пространстве породы, а также выявить наличие и долю различных пластовых флюидов.

Определение распределения плотностей в затрубном пространстве выполняется с помощью гамма-гамма-дефектомерии и гамма-гамма-цементометрии.

Гамма-гамма-дефектомер оснащён источником гамма-излучения и одним датчиком, который расположен на оси прибора [12]. Датчик устанавливается в центре кольцевого экрана из свинца с радиальным окном, которое вращается со скоростью 6–7 оборотов в минуту для измерения изменений интенсивности рассеянного гамма-излучения вдоль скважины. При проведении измерений в точках получается дефектограмма, а при использовании вращающегося экрана формируется круговая цементограмма.

При интерпретации данных измерений изучают значения и изменения кривых, которые зависят от расположения колонны и характера среды в затрубном пространстве.

Выделение соответствующих интенсивностей на кривых позволяет сделать вывод о заполнении зазоров вокруг колонны. Высокая стабильность показателей кривой является признаком однородной среды. В случае, когда плотность структур в затрубном пространстве непостоянна, зарегистрированная кривая будет отличаться значительными изменениями. В качестве примера аппаратуры, выполняющей такой вид каротажа, можно привести СГДТ-НВ.

Методы, основанные на использовании радиоактивных короткоживущих изотопов, входят в категорию методов меченого вещества. Они применяются для внедрения в исследуемую область веществ с необычными физическими свойствами, которые можно определить с помощью промыслово-геофизических методов. Однако их использование требует значительных затрат и временных ресурсов и оправдано лишь в случае, если другие методы оказываются неэффективными [23]. Для гамма-метода с использованием пометки вещества радиоактивными изотопами выбирают элементы с интенсивным гамма-излучением и хорошим растворением в жидкости.

В случае гамма-плотнометрии, применяемой для анализа плотности жидкостей в скважинах, используются вариации гамма-гамма-метода [12]. Этот подход предпочтителен при мониторинге эксплуатации скважин, а также для выявления и оценки водоносных горизонтов.

Гамма-плотнометрия наиболее эффективна для изучения состава флюида и используется для решения следующих вопросов контроля эксплуатации:

а) выявление интервалов и источников обводнения (совместно с другими ГИС);

б) выявление интервалов притока в скважину воды и газа при оценке эксплуатационных характеристик пласта (в комплексе дебитометрией и термометрией);

в) исследование состояния забоя скважины и технического состояния скважины.

Она базируется на облучении жидкости между источником и детектором. В её модификации, методе гамма-гамма-рассеяния, замеряется рассеяние гамма-квантов жидкостью вокруг прибора. В промышленности для этой цели часто применяются устройства, аналогичные модулю плотномера ПИКП-38.

Гамма-гамма цементометрия (ГГЦ) оценивает качество цементирования скважин. При гамма-гамма цементометрии производят регистрацию интенсивности рассеянного гамма-излучения с помощью зонда, содержащего импульсный источник среднеэнергетического гамма-излучения и детектор рассеянного гамма-излучения. Более плотная среда рассеивает больше гамма-излучения.

При проведении ГГЦ зонд должен быть отцентрован. Для количественной оценки плотности используют калибровочные и интерпретационные зависимости. Гамма-гамма цементометрия определяет границы заполненного цементом пространства, зоны смешения цемента с жидкостью, а также наличие дефектов цементного камня и эксцентриситета обсадной колонны [3].

Обычно для гамма-гамма цементометрии применяются модули ЦМ8/10 и СГДТ-НВ. Она является широко используемым методом контроля за процессом цементирования и оценки состояния затрубного пространства скважин и информация, получаемая с ее помощью жизненно важна для обеспечения герметичности обсадной колонны и предотвращения утечек флюидов.

Гамма-каротаж также применяется для определения глубины текущего забоя скважины. Отбивка забоя необходима перед спуском глубинного оборудования для определения текущего забоя и зумпфа скважины. Для этого делают запись ГК, и локации муфт в призабойной зоне [24]. Полученную диаграмму накладывают на привязочную, прибавляют «мертвый конец» геофизического прибора и получают точную глубину текущего забоя, как показано на рисунке 2.

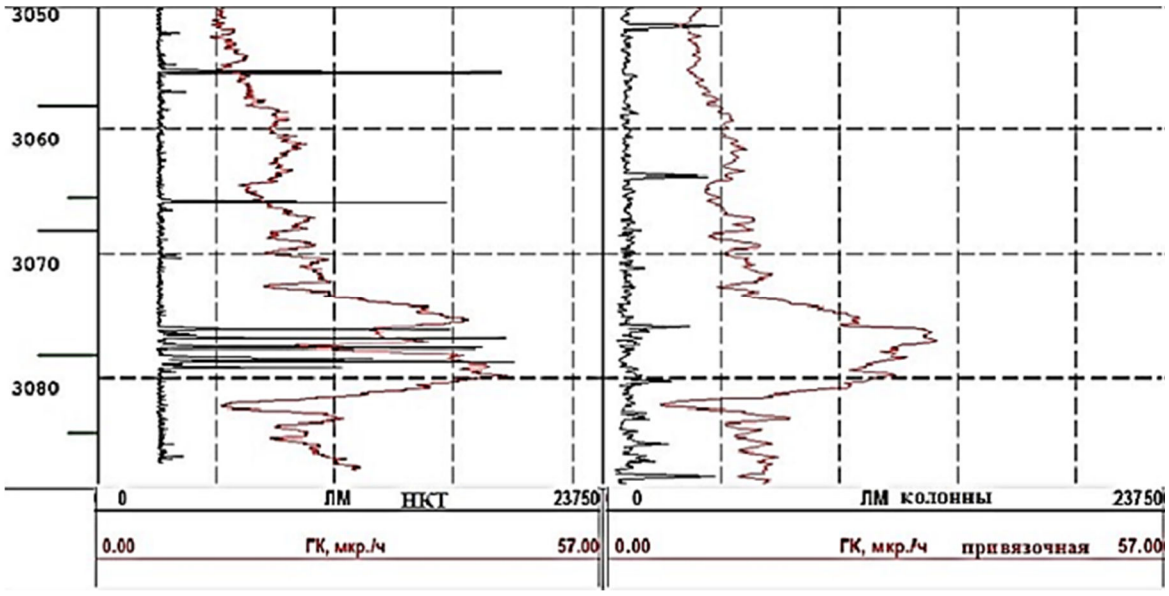

Рисунок 2 – Определение глубины забоя скважины

Акустический каротаж

Метод волнового акустического каротажа (ВАК) представляет собой эффективный подход к изучению параметров акустических колебаний в скважинах и горных образцах. Он основан на теории упругих деформаций пористых насыщенных сред и обеспечивает доступ к информации о свойствах системы «скважина – массив горных пород» [25]. Современные приборы для проведения ВАК обладают высокой функциональностью и содержат множество компонентов, что позволяет регистрировать акустические сигналы в широком диапазоне частот, начиная от $n \times 10^2$ Гц и заканчивая $n \times 106$ Гц, и выделять различные типы волн. Результаты ВАК представляют собой диаграммы интервальных времен, амплитуд и коэффициентов затухания продольных и поперечных волн, а также фазокорреляционные диаграммы (ФКД) и волновые картины. Эти данные позволяют определить расположение межфлюидных контактов в различных типах залежей.

Применение ВАК требует надежного сцепление цементного камня с обсадной колонной и горными породами. При использовании этого метода в скважине возникают упругие колебания, которые распространяются внутри нее и в окружающих породах, а затем регистрируются приемниками.

Анализ общей и линейной интенсивности изменения шума позволяет оценить положение границы между газом и жидкостью. Волновой акустический каротаж обладает значительным потенциалом в определении положения межфлюидных контактов в различных типах залежей и представляет собой важный инструмент для геологоразведочных и нефтедобывающих компаний, поскольку обеспечивает ценную информацию о составе и структуре горных пород внутри скважины. Как правило, ВАК может быть проведен с использованием универсальной аппаратуры, такой как КСА-Т12, либо более специализированных приборов, таких как АК-73ПМ, АВАК-11 и т.д.

Основой использования ВАК для оценки газонасыщенности является значительное различие сжимаемостей основных компонентов коллекторов: горной породы и насыщающих поровое пространство флюидов [26].

На основании данных ФКД вычисляется индекс динамической сжимаемости (ИДС). Он отражает соотношение сжимаемостей горной породы и флюида в ее порах и изменяется в зависимости от насыщенности пород. При интерпретации показателя ИДС используется априорная информация о пористости, плотности и глинистости отложений, качество которой во многом значительно влияет на информативность метода.

Широкополосный акустический каротаж основан на цифровой регистрации полной волновой картины акустического сигнала с выделением и обработкой всех типов волн (P, S, L-St). Регистрация сигнала производится при помощи двух приёмников с базой 0,4 м на зондах различной длины. Длина зонда подбирается в зависимости от типа изучаемого разреза.

Возможности широкополосного акустического каротажа включают в себя оценку состояния цементного камня и его сцепления с обсадной колонной, а также измерение зазора между колонной и породой. Тем не менее, данный метод не способен точно определить зазоры менее 10 мкм. Однако это ограничение не является критическим, поскольку небольшие зазоры обычно не влияют на техническое состояние скважины. Широкополосный акустический каротаж может проводиться с использованием оборудования СПАК-6Д или более современного оборудования, осуществляющего кросс-дипольный каротаж.

Шумометрия предусматривает измерение распределения акустических шумов, возникающих при различных термодинамических и газогидродинамических процессах, по частотам [3, 27]. Акустические шумы, возникающие в процессе течения флюидов в различных диапазонах частот, играют важную роль в анализе физических свойств флюидов и окружающей среды. Термодинамические шумы имеют диапазон от нескольких десятков герц до нескольких сотен килогерц. Газогидродинамические шумы являются более низкочастотными и занимают диапазон от нескольких герц до нескольких килогерц. Изучение распределения звуковых колебаний по частоте и амплитуде позволяет определить основные характеристики движущегося флюида и среды, в которой происходит движение.

Для целей шумометрии используют гидрофоны и их комплексы. Так как гидрофон является довольно распространенным измерительным устройством при ГИС, проведение шумометрии возможно и без использования специальной аппаратуры. Так, например, зонд для акустической цементометрии способен проводить необходимые для шумометрии измерения. При таком подходе операция по измерению шумов проводится при выключенном источнике звука и может потребовать дополнительных манипуляций для спуска или подъема зонда. Исследования по шумомерии способны выявить места поступления флюидов из пластов в скважину, а также интервалы перетока флюидов между различными пластами [3].

Исследования ультразвуковым методом проводят в открытом стволе скважины. Для изучения акустических свойств горных пород ультразвуком используется возбуждение упругих колебаний частотой 10–75 кГц. Скоростные и амплитудные характеристики полученного от горных пород сигнала зависят от литологии разреза и его упругих свойств.

Спектральная шумометрия представляет собой метод обработки и анализа записей акустических и электромагнитных сигналов. С ее помощью определяют структуру, состав и фазовые характе-

ристики потоков нефтегазовой смеси при их движении как в скважине, так и в пласте или заколонном пространстве. Спектральная шумометрия применяется для определения дренируемых толщин пласта, состава фильтрации, а также параметров и структуры каналов фильтрации в породе.

Измерения при спектральная шумометрии возможны, например, при помощи прибора «АВИС» [18]. При замерах шума фоновые статичные спектры изолируются и вычитаются из сигнала, а затем производится анализ аномалий амплитуд по частоте и глубине. Результаты измерений цифрового формата передаются на поверхность, где они подвергаются анализу с применением стандартных методов, таких как преобразование Фурье. Спектральная шумометрия может быть выполнена с использованием аппаратуры типа SNL-HD.

Акустическая цементометрия основана на измерении характеристик волнового поля, созданного источником упругих колебаний с частотой излучения около 10–30 Гц. При акустической цементометрии регистрируют следующие параметры:

- амплитуда или коэффициент эффективного затухания волны по колонне в фиксированном временном окне (положение окна выбирается значением интервального времени распространения волны по колонне);
- интервальное время, амплитуда и затухание первых вступлений волн, распространяющихся в горных породах;
- фазокорреляционные диаграммы (ФКД).

Акустическая цементометрия также базируется на принципах изучения упругих свойств облучаемых поверхностей. С ее помощью определяют заполнение затрубного пространства, а также дефекты цементного камня и раскрытость кольцевых зазоров [3]. Эффективность акустической цементометрии снижается в высокоскоростных разрезах. Она может быть выполнена при помощи аппаратов МАК, УЗБА, АКЦ-НВ-48.

Скважинное акустическое телевидение использует отраженные высокочастотные импульсы для сканирования поверхности скважины. Запись измерений происходит по винтовой траектории. Одноэлементный зонд работает в импульсном режиме и производит замеры времени и амплитуд отраженных волн узким лучом. Скважинное акустическое телевидение используется для определения размерных паромеров колонны, выявления дефектов и определения положения элементов конструкции скважины [3]. Этот метод может быть осуществлен с использованием такой аппаратуры как АСТ-К-80.

Электромагнитный каротаж

Индукционное каротажное зондирование анализирует удельное сопротивления горных пород. В процессе зондирования измеряют вторичное поле вихревых токов, возникающих в породах под воздействием электромагнитного поля.

Диэлектрический каротаж изучает влияние диэлектрической проницаемости среды на показания скважинного генератора, питаемого переменным током частотой от 10 МГц.

Определение геоэлектрических характеристик проводится на основе изменений резистивности и диэлектрических свойств горных пород. В случае низкой минерализации вод предпочтительным является использование диэлектрического каротажа. Также данные методы неприменимы в скважинах, обсаженных металлической обсадной колонной.

Результаты индукционного и диэлектрического каротажа позволяют отслеживать изменение геоэлектрических характеристик в прискважинной зоне. При интерпретации данных изучаются вариации измерений относительно фонового уровня, который обычно измеряется в обсадной колонне. Однако полученные данные требуют корректировок из-за влияния обсадной колонны и цементного кольца.

Наиболее информативным электромагнитным методом каротажа считается высокочастотное индукционное изопараметрическое зондирование (ВИКИЗ). Этот метод представляет измерение параметров магнитного поля с помощью трёхкатушечных индукционных зондов, имеющих гидродинамическое и геометрическое сходство.

ВИКИЗ является типичной зондирующей системой, измеряемой величиной в которой является разность фаз высокочастотного электромагнитного поля между источником излучения и разнесёнными приемниками. Стандартная технология ВИКИЗ предполагает получение пяти записей индукционных зондов на разной глубине (от 2 до 0,1 м) и диаграммы потенциалов самопроизвольной поляризации при необсаженном стволе. Данный метод может быть реализован с использованием аппаратуры ГОРИЗОНТ-73-ВИКИЗ.

Боковой каротаж основан на применении зондов с фокусированной системой питающих электродов. Существуют 3-х, 7-ми и 9-ти электродные модификации метода, которые известны под названием «многозондовый боковой каротаж» [28]. Задачей данного метода является определение истинного удельного сопротивления пласта и зоны проникновения в Ом · м. Боковой каротаж может быть выполнен аппаратурой типа ЭКВР или 2БК-7/9.

Боковое каротажное зондирование – это электрический каротаж с использованием нескольких однотипных не фокусированных зондов различной длины, обеспечивающих радиальное электриче-

ское зондирование пород. Измеряемая величина с его помощью величина – это кажущееся удельное электрическое сопротивление. Боковое каротажное зондирование может выполняться аппаратурой АБКТ. Его применяют для исследований всех типов разрезов с целью определения [29]:

- радиального градиента электрического сопротивления пород и выделения на этой основе пород-коллекторов, в которые происходит проникновение промывочной жидкости;
- удельных электрических сопротивлений (УЭС) неизменённой части пластов и зон проникновения;
- оценки глубины проникновения.

Микробоковой каротаж отличается от бокового каротажа в основном фокусировкой тока, которая обуславливает малую величину исследуемой области глубиной порядка 40–50 см. Подобная особенность обусловлена малым расстоянием между электродами. Также на результаты микробоковой каротаж практически не влияют загрязнения между башмаком и стенкой скважины. Это обусловлено наличием экранного электрода, благодаря которому ток попадает в стенку скважины практически перпендикулярно. Микробоковой каротаж наиболее часто применяется в условиях контакта зонда с минерализованной промывочной жидкостью [30]. Он может быть выполнен при помощи модуля МК-ГП.

При помощи метода микрокаротажа уточняют разрез скважин и прочие литологические данные. Основное преимущество этого метода заключается в его способности исследовать малые глубины, что обусловлено размерами микрозондов, которые меньше, чем диаметра скважины. Таким образом, область исследования ограничивается частью пласта, непосредственно прилегающей к стенке скважины, то есть промытой зоной.

Существует два основных варианта микрозондов. Первый вариант представляет собой нефокусированную стандартную конфигурацию, в которой три электрода размещены на расстоянии 25 мм друг от друга. Второй вариант использует радиальную фокусировку, к нему относятся экранированные зонды микробокового каротажа. Микрокаротажное зондирование может быть проведено с использованием скважинного прибора МК-БМК-К-90.

Метод потенциалов собственной поляризации изучает электрическое поле, самопроизвольно возникающее в результате естественной электрохимической активности горных пород, вызванной диффузионными, диффузионно-адсорбционными и фильтрационными потенциалами в скважине и её окрестностях. Искомый потенциал измеряется как разность потенциалов между неподвижным электродом около устья скважины, и электродом, перемещающимся по стволу скважины. Естественная разность потенциалов электродов компенсируется, однако полностью учесть и скомпенсировать все сторонние разности потенциалов в цепи измерения невозможно, поэтому кривая собственной поляризации отражает не абсолютное значение потенциала, а его изменение по скважине.

В соответствии с данным методом на диаграммах не используется привычная линия отсчёта. Вместо этого применяется «линия глин», которая закрепляется против мощных глиняных пластов. Отклонение кривой от этой линии определяется как амплитуда потенциала ПС. Максимальная амплитуда соответствует чистым песчаным пластам-коллекторам, а с увеличением содержания глины в пласте амплитуда ПС уменьшается. Кривая ПС позволяет легко выделить проницаемые песчаные пласты в терригенном разрезе и, в некоторых случаях, определить относительную глинистость пород.

Помимо выделения глинистых интервалов и проницаемых песчаников, метод ПС используется для анализа геологических разрезов и корреляции отдельных пластов по соседним скважинам, а также для определения пористых известняков и оценки пористости и проницаемости пород.

Электрокаротаж сопротивлений (метод кажущегося сопротивления) изучает удельное электрическое сопротивление горных пород. Использование данного параметра является наиболее содержательным при оценке коллекторских свойств и насыщения продуктивных пластов.

Долгое время электрокаротаж сопротивлений был ограничен требованием отсутствия обсадки [18]. Применение зондов бокового каротажного зондирования при наличии металлической обсадной колонны неизбежно приводит к существенным утечкам электрического тока. Но развитие современных технологий позволило ряду компаний реализовать основы применения БКЗ в обсаженных металлическими колоннами скважинах, заложенные Альпиным и Стюартом в 1939 году и 1949 году соответственно. Устройствами, реализовавшими эти принципы стали «TCR» от компании Baker Allas и «CHFR» от компании «Schlumberger».

Зонды бокового каротажного зондирования имеют диаметр 86 мм и определённое количество электродов. Для измерения сопротивления прибор формирует ток порядка 0,5–6 А частотой 1 Гц. Ток распространяется преимущественно вертикально вдоль обсадной колонны. Меньшая часть от тока, ушедшего вниз по стволу скважины, достигает горных пород. При помощи электродов зонды определяют разность потенциалов той части тока, которая достигла горных пород при движении вниз ствола скважины (около 5–500 нВ) [31].

Полученные измерения включают в себя потери как в обсадной колонне, так и в изучаемой среде. При обработке результатов утечку тока через колонну определяют путем калибровки, что поз-

воляет получить искомый пластовый ток. Боковое каротажное зондирование позволяет исследовать пласт на глубину до 2–10 м, а погрешность измерения для пластов с сопротивлением 1–10 Ом · м составляет около 10 %.

Локация муфт основана на явлении электромагнитной индукции. При ее проведении регистрируются изменения магнитной проводимости в металле обсадной колонны и насосно-компрессорных труб (НКТ) вследствие нарушения их сплошности [3]. Измерения выполняются локатором муфт, датчик которого представляет собой дифференциальную магнитную систему, состоящую из многослойной катушки с сердечником и двух постоянных магнитов, которые создают в катушке и вокруг неё постоянное магнитное поле. При перемещении локатора вдоль колонны в местах нарушения сплошности металла труб происходит перераспределение магнитного потока и индуцирование в измерительной катушке импульсов ЭДС.

Локация муфт применяется для определения положения муфтовых соединений колонны, точной привязки показаний других приборов к положению муфт, взаимной привязки показаний нескольких приборов, уточнения глубины спуска лифтовых труб, определения текущего забоя скважины, в благоприятных условиях – определения интервала перфорации и выявления мест нарушения (типа разрывов, трещин) обсадных колонн, НКТ. Локация муфт может быть выполнена при помощи различной аппаратуры, например, ГК-ЛМ-76.

Электромагнитная дефектоскопия основана на анализе вихревого электромагнитного поля, регистрируемого индукционным магнитоприемником после прекращения воздействия генераторной катушки зонда на обсадную колонну. Наведенное вторичным полем электромагнитной дефектоскопии (ЭДС) в магнитоприёмнике затухает по экспоненциальному закону с декрементом, зависящим от проводимости, магнитной проницаемости и радиуса изучаемой зоны. Метод направлен на обнаружение башмаков и муфт обсадных колонн, определение толщины стенок труб, выявление дефектов, смятий и разрывов, а также оценку качества свинчивания труб в муфтах [32]. Применение электромагнитной дефектоскопии осуществляется с использованием аппаратуры ЭМДС-С.

Индукционная резистивиметрия основана на измерении удельной электрической проводимости жидкостной смеси в стволе скважины методом вихревых токов. Скважинный индукционный резистивиметр представляет собой датчик проточно-погружного типа, состоящий из двух тороидальных катушек: возбуждающей и приёмной. Объёмный виток индукционной связи образуется через жидкость, находящуюся вокруг датчика. Существуют две модификации резистивиметров. Бесконтактные индукционные резистивиметры используют для измерения удельной проводимости, а одноэлектродные на постоянном токе для измерения удельного сопротивления.

Метод скважинной магнитоимпульсной дефектоскопии-толщинометрии (МИД-К) изучает пространственное распределение затухающих вихревых токов в колоннах труб. Регистрируемым сигналом является ЭДС в приемной катушке, которая индуцируется вихревыми токами при отключении тока намагничивания. Получаемый сигнал зависит от объема, удельной электрической и магнитной проницаемости металла. Увеличение данных параметров замедляет затухание вихревых токов [33]. МИД-К возможно использовать для оценки состояния отдельной колонны сложной многоколонной конструкции. Это достигается путем регулировки длительности импульса тока намагничивания и паузы для регистрации ЭДС на измерительной катушке.

При строительстве скважин МИД-К применяется для контроля конструкции общей скважины, установки обсадных колонн и хвостовика, а также для оценки технического состояния обсадных колонн. В эксплуатируемых скважинах с его помощью определяют фактические интервалы перфорации, техническое состояние обсадной колонны, а также фактическую глубину установки элементов конструкции скважины [12]. Данный метод реализуется с использованием соответствующего прибора МИД-К.

Термокаротаж

Термокаротаж (термометрия) изучает естественные и искусственные тепловые поля в скважинах [3]. Естественные тепловые измеряются в неактивных или долго простаивающих скважинах, тогда как искусственные т в действующих или кратковременно простаивающих эксплуатационных скважинах.

Термокаротаж для определения ГВК в скважине включает последовательные измерения в рабочем и остановленном состояниях скважины с последующим сопоставлением полученных данных. Понижение температуры в рабочей зоне скважины характерно для газоносной части пласта, в то время как повышение температуры свидетельствует о наличии водоносной части. Для термометрии применяются различные приборы, такие как ЭС, ЭТМИ, ЭТС и другие.

Нестационарные тепловые поля в бурящихся, нагнетательных и эксплуатационных скважинах характеризуют различные эндо- и экзотермические, газогидродинамические и другие процессы, происходящие в стволе скважины и в окружающих её породах. Метод искусственного теплового поля позволяет определять термодинамические и газогидродинамические характеристики эксплуатируемых объектов с целью контроля разработки нефтегазовых месторождений и эксплуатации подземных хранилищ газа, а также изучать техническое состояние скважин [18].

Барометрия

Методика барометрии основывается на анализе изменений давления или его градиента внутри скважины либо во времени. Измерительной базой барометрии являются глубинные манометры, среди которых различают манометры абсолютного давления и дифференциальные манометры [23]. При помощи дифференциальных манометров по точке перегиба кривой давления в зависимости от глубины определяют положение ГВК.

Глубинные манометры, поддерживающие автономную регистрацию, оставляют на якоре в указанном интервале. Также автономные манометры могут входить в состав пластоиспытателей и иных комплексных зондов. Помимо этого, существуют дистанционные манометры, работающие по геофизическому кабелю. По типу преобразования измеряемого давления различают пьезокристаллические, мембранные и струнные манометры. Проведение скважинной барометрии часто осуществляется в составе приборного комплекса «приток – состав» и может включать в себя комплексный подход к анализу данных.

Расчётные методы

Для выявления ГВК используется приближённый подход, если данные о скважинах, достигших водоносного пласта, недоступны [2]. Этот метод, известный как гидростатический, предполагает равенство давления на газовой-водной границе гидростатическому давлению.

Данные соотношения между давлениями в газовой и водной частях залежи позволяют оценить ГВК:

$$p_к = 10^{-6} \cdot \rho_{воды} \cdot g \cdot L;\ p_к = p_y \cdot e^s,$$

где $s = 0{,}03415 \cdot \dfrac{\overline{\rho} \cdot L_к}{z_{ср} \cdot T_{ср}}$.

Приравнивая данные формулы и раскладывая ех в ряд, получают выражение для определения глубины положения ГВК:

$$L_к = \frac{p_y}{10^{-6} \cdot \rho_{воды} \cdot g - p_y \cdot s_1},$$

где $s_1 = 0{,}03415 \cdot \dfrac{\overline{\rho}}{z_{ср} \cdot T_{ср}}$.

Также для целей определения ГВК известен расчётный метод В.П. Савченко, который используется при наличии двух или более скважин, вскрывших водяную и газовую части пласта, или по данным одной скважины, в которой отдельно испытаны водяная и газовая части [2].

Аналитическое определение положения ГВК также возможно на основании анализа газодинамических исследований скважин (ГДИ) [9]. Количественная оценка ГВК в рамках данного метода не рассматривается. Для определения изменения положения ГВК необходимо изучение динамики изменения комплексного параметра проводимости ($k \times h$), определяемого в ходе проведения ГДИ. Изменение этого параметра по каждой скважине позволяет определить работающую газонасыщенную мощность пласта в динамике. Рост комплексного параметра проводимости свидетельствует о вовлечении в процесс фильтрации дополнительных пропластков залежи, а его уменьшение может быть вызвано несколькими причинами, одной из которых является изменение уровня ГВК в околоскважинной области. Как показывает опыт ГДИ, практически всегда изменение комплексного параметра проводимости свидетельствует именно о перемещении подошвенной воды в газонасыщенную часть продуктивного пласта.

Дебитометрия

Дебитометрия, будучи одним из ключевых методов анализа характеристик пласта, существует в двух вариациях: механической и термокондуктивной [12].

Термокондуктивные расходомеры оперируют принципом термоанемометра: спираль термосопротивления, находящаяся в потоке скважинной жидкости, подогревается до температуры выше окружающей среды. Поток пластового флюида охлаждает спираль, что изменяет её сопротивление и используется как показатель расхода. Скорость изменения температуры спирали зависит от скорости потока пластового флюида. Тепловые характеристики среды, сила тока и диаметр скважины также влияют на теплоотдачу спирали, но в условиях однородного потока и постоянного диаметра скважины средняя линейная скорость потока оказывает основное влияние на теплоотдачу спирали. Это позво-

ляет строить профиль притока / поглощения флюида. Кривая, отображающая изменение сопротивления термодатчика во времени, называется кривой термокондуктивной расходометрии. Примером такой аппаратуры может служить 4РИ.

Механические расходомеры представляют собой тахометрический преобразователь скорости потока. Они основаны на преобразовании частоты вращения турбинки, приводимой в движение потоком флюида, в электрический сигнал с использованием магнитного прерывателя тока. Этот сигнал пропорционален измеряемому дебиту. Для получения точных данных механической дебитометрии применяется скважинный прибор АГДК-42-5.

В зависимости от условий измерений дебитомеры подразделяются на пакерные и беспакерные. Более популярными являются устройства с механическими пакерами, которые способны фиксироваться в скважине по команде с поверхности и обеспечивать измерения через калиброванное сечение прибора.

Влагометрия (диэлькометрия)

Диэлькометрическая влагометрия (диэлькометрия) основана на изучении относительной диэлектрической проницаемости флюидов в стволе скважины. Метод чувствителен к содержанию в нефти воды любой минерализации. Применяют для определения состава флюидов в стволе скважины, выявления интервалов притоков в скважину волы, нефти, газа и их смесей.

Скважинные влагомеры представляют собой «LC» или «НС»-генераторы, в колебательный контур которых включен измерительный конденсатор проточного типа. Между обкладками конденсатора протекает водонефтяная, газоводяная или многокомпонентная смесь, изменяющая ёмкость датчика с последующим преобразованием изменения ёмкости в сигналы разной частоты. Для определения влажности может быть применен расходомер-влагомер «Кобра-36РВ».

Иные методы

Для определения ГВК известен метод перфорации под давлением в предварительно осушенной скважине с последовательным вскрытием верхней и нижней части пласта. Также для различных целей компаниями были разработаны уникальные аппаратные комплексы, способные проводить необходимые измерения.

Метод ГДК-ОПК известен как «опробование пластов» и находит своё применение в необсаженных скважинах на этапах от разведки до завершения эксплуатации месторождений. Опробование пластов проводится при помощи скважинных приборов, используемых в зависимости от конкретных геолого-технических условий. Наиболее распространенным прибором для опробования пластов является модульный испытатель пластов (MDT) [34]. Отличительной особенностью MDT является способность определения типа и качества флюида с помощью поточных оптических анализаторов.

Прибор CHDT, взаимодействующий с MDT, обладает уникальной способностью выполнения комплекса операций за один спуск: просверливает отверстия в обсадной колонне, проникает через них в пласт, осуществляет многократные замеры давления, отбирает представительные пробы пластового флюида и закупоривает просверленные отверстия для восстановления герметичности. Встроенный в измерительный зонд комплекс датчиков контролирует давление, удельное электрическое сопротивление флюида и глубину проникновения сверла [35].

Метод микрокавернометрии (МКВ) широко применяется в исследованиях всех поисковых и разведочных скважин. Конструкция микрокавернометра включает реохорд, движок которого связан с рычагами «башмаков» микроустановок, определяющими диаметр скважины. МКВ также используется для определения толщины глинистой корки. Этот метод часто сочетается с другими микрометодами и может выполняться при помощи аппаратуры типа МК-УЦ; МК-М.

Шаблонирование используется для проверки возможности спуска глубинного оборудования и инструментов. Шаблон для эксплуатационной колонны должен быть больше спускаемого оборудования на 20–30 % по длине и на 3–4 мм по диаметру. Корпус шаблона должен быть цельным с перпендикулярными к оси торцами. Фаски как на нижнем, так и на верхнем торце не допускаются, так как при спуске шаблона в скважину он нижним торцом срезает со стенки эксплуатационной колонны возможные смолопарафиновые отложения, заусенцы и др.; наличие фаски на верхнем торце при подъёме шаблона может привести к затягиванию случайно попавших в скважину инородных предметов в зазор между корпусом шаблона и внутренней стенкой обсадной колонны и заклиниванию его. Шаблон для НКТ должен быть больше спускаемого оборудования на 50 % по длине и на 4–5 мм по диаметру [36]. Для шаблонов, применяемых в НКТ, допускается наличие направляющих фасок по обоим торцам.

Скважинная профилеметрия, известная также как кавернометрия, позволяет точно определить размеры и форму поперечного сечения скважины. Измерения в ней производятся одной или несколькими парами противоположно расположенных механических рычагов, скользящих по стенке скважины. Получаемый сигнал формируется посредством использования резистивных мостов, механически связанных с измерительными рычагами. Примером скважинного профилемера может служить СПР – скважинный профилемер-радиусомер с восемью измерительными рычагами.

Скважинная профилеметрия имеет две модификации: вертикальную и горизонтальную. При вертикальной профилеметрии происходит замер по стволу скважины, в то время как при горизонтальной профилеметрии детально исследуется сечение скважины на определенной глубине.

Для целей изучения внутрискважинных процессов некоторые компании разработали комплексы скважинного видео для получения качественных видеозаписей со дна активной скважины. В таких системах видеокамера находится на поверхности, а на дно спускаются оптиковолоконные кабели для освещения и передачи изображения. Для защиты кабелей от загрязнения применяются специальные покрытия, а манипуляторы направляют камеру на интересующие объекты.

Итоговая видеозапись, отображает движение флюида и другие внутрискважинные процессы. Скважинное видео также позволяет контролировать состояние забоя скважины, однако его применение серьезно ограничено требованиями по прозрачности флюидов.

Заключение

Представленный в данной статье перечень методов, применяемых при промыслово-геофизических исследованиях для контроля за разработкой газовых и газоконденсатных залежей основан на анализе нормативно-технической документации и специализированной литературы. Все отобранные для целей контроля за разработкой газовых и газоконденсатных залежей методы были систематизированы. Их принципы действия и области применения описаны.

Из проведённого анализа следует, что существует значительный выбор разнообразных методов промыслово-геофизических исследований для контроля за разработкой газовых и газоконденсатных залежей, что позволяет применять различные их комбинации для повышения точности исследований. Несмотря на большое количество методов и их модификаций, для каждой приведённой задачи на основе производственного опыта определены наилучшие методы, которые целесообразно применять в тех или иных условиях. Согласно данным, изложенным, к примеру, в методических указаниях по комплексированию и поэтапному осуществлению геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и газовых месторождений, пользователь недр может подобрать наиболее оптимальный метод определения интересующего его параметра.

Также стоит отметить, что многие компании в области нефтяного сервиса периодически предлагают новые передовые устройства, способные проводить исследования в тех условиях или с такой точностью, которая была бы недостижима при использовании традиционных методов.

Список литературы:

1. Коротаев Ю.П. Транспорт и подземное хранение газа / Ю.П. Коротаев, А.И. Ширковский. – М. : Недра, 1984. – 486 с.

2. РД 153-39.0-072-01. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (дата введения 01.07. 2001).

3. Ипатов А.И. Геофизический и гидродинамический контроль разработки месторождений углеводородов / А.И. Ипатов, М.И. Кременецкий. – М., Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. – 780 с.

4. РД 153-39.0-109-01. Методические указания по комплексированию и этапности выполнения геофизических, гидродинамических и геохимических исследований нефтяных и нефтегазовых месторождений (дата введения 01.03.2002).

5. ГОСТ 32358-2013 Скважины нефтяные и газовые. Геофизические исследования и работы в скважинах. Общие требования.

6. Adaptability analysis and optimization of log suite for uncased wellbores of shale gas reservoirs: A case study of Sichuan Basin, China / Benke Shen, Ning Xia, Jun Li, Jing Lu, Song Hu, Xiang Ge, Zhiyuan Liu, Kun Liu, Qiangfu Kong // Energy Geoscience. – 2023. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 100–117.

7. Буддо И.В. Электромагнитные исследования методом ЗСБ 2D, 3D, 4D: последовательность постановки геологоразведочных работ / И.В. Буддо, И.А. Шелохов, Н.В. Мисюркеева, Ю.А. Агафонов // Геодинамика и тектонофизика. – 2021. – № 12(3S). – С. 715–730.

8. Климов В.В. Повышение достоверности геофизических методов в наклонно-направленных и горизонтальных скважинах / В.В. Климов, О.В. Савенок, Н.М. Лешкович // Инженер-нефтяник. – 2017. – № 3. – С. 33–38.

9. Чепкасова Е.В. Диагностирование перемещения газоводяного контакта с помощью результатов газодинамических исследований скважин / Е.В. Чепкасова // Газовая промышленность. – 2017. – № 5(752). – С. 42–45.

10. КСАТ-РК5.76 // ГеоСКАТ: Научно-технический центр. – URL : http://geoskat.ru/views/KSAT-RK5-76/index.php (дата обращения 13.03.2023).

11. Жарикова Н.Х. Анализ геофизических исследований скважин и нефтеносности баженовской свиты на Северном нефтегазоконденсатном месторождении / Н.Х. Жарикова, О.В. Савенок, Л.Г. Кусова // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2023. – № 1. – С. 181–195.

12. Захарченко Л.И. Геофизические методы контроля разработки МПИ : учеб. пособие. – Ставрополь : Северо-Кавказский федеральный университет, 2017. – 250 с.

13. Кожевникова Е.Е. Основы промысловой геологии и разработки месторождений нефти и газа: учебно-методическое пособие. – Пермь : Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2020. – 88 с.

14. Шепелева И.С. Применение ядерно-магнитного каротажа в сильном поле для исследования скважин в условиях Припятского прогиба / И.С. Шепелева // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. – 2018. – № 3. – С. 12–17.

15. Отечественная технология ядерно-магнитного каротажа сильного поля. Состояние и развитие / С.С. Сошин [и др.] // Каротажник. – 2021. – Вып. 6 (312). – С. 112–123.

16. Опыт применения ядерно-магнитного каротажа для изучения газовых залежей / А.В. Малинин [и др.] // Каротажник. – 2019. – Вып. 4 (298). – С. 30–42.

17. Патент на изобретение RU 2679630 C1. Способ ядерного магнитного каротажа и устройство для его реализации / В.Д. Скирда, А.С. Александров, Д.Л. Мельникова, М.М. Дорогиницкий, О.И. Гнездилов, В.М. Мурзакаев, А.В. Брагин. Зарегистрирован 12.02.2019.

18. Дьяконов Д.И. Общий курс геофизических исследований скважин : учебник для вузов / Д.И. Дьяконов, Е.И. Леонтьев, Г.С. Кузнецов. – М. : Недра, 1984. – 432 с.

19. Климов В.В. Основы геофизических исследований при строительстве и эксплуатации скважин на нефтегазовых месторождениях : учеб. пособие / В.В. Климов, О.В. Савенок, Н.М. Лешкович. – Краснодар : ООО «Издательский Дом – Юг», 2016. – 274 с.

20. Кутырев Е.Ф. К вопросу истолкования радиогеохимических аномалий в добывающих скважинах Западной Сибири / Е.Ф. Кутырев // Георесурсы. – 2008. – № 5. – С. 14–18.

21. Ядерно-геофизические методы в модификации углерод-кислородного и трёхзондового импульсного нейтронного спектрометрического каротажа / Р.Г. Гайнетдинов [и др.] // Экспозиция Нефть Газ. – 2013. – С. 17–20.

22. Геофизика : учеб. пособие / В.А. Богословский [и др.]. – М. : Издательство «КДУ», 2018. – 320 с.

23. Головин Б.А. Контроль за разработкой нефтяных и газовых месторождений геофизическими методами : учеб. пособие / Б.А. Головин, М.В. Калинникова, А.А. Муха. – Саратов : Саратовский госуниверситет им. Н.Г.Чернышевского, 2011. – 63 с.

24. Дмитриев А.Ю. Ремонт нефтяных и газовых скважин : учеб. пособие. – Томск : Томский политехнический университет, 2016. – 272 с.

25. Ивакин Б.Н. Акустический метод исследования скважин / Б.Н. Ивакин, Е.В. Карус, О.А. Кузнецов. – М. : Недра, 1978. – 320 с.

26. Городнов А.В. Оценка коллектора по данным волновой акустики – новые возможности интерпретации / А.В. Городнов, В.М. Добрынин, В.Н. Черноглазов // Геофизика. – 2000. – № 2. – С. 27–33.

27. Ильина Г.Ф. Промысловая геофизика : учеб. пособие. – Томск : Томский политехнический университет, 2004. – 122 с.

28. Климов В.В. Новые технические средства, технологии и методология геолого-геофизического контроля технического состояния крепи газовых и газоконденсатных скважин, в том числе скважин с аномально высокими пластовыми давлениями и температурами / В.В. Климов, О.В. Савенок, А.В. Кузьмин // Нефть. Газ. Новации. – 2013. – № 3(170). – С. 33–37.

29. Абдыкаримова В.С. Анализ комплекса геофизических исследований скважин, применяемого при изучении разведочных скважин на месторождении Карамандыбас / В.С. Абдыкаримова // Молодой учёный. – 2020. – № 15(305). – С. 22–25.

30. Егоров А.С. Геофизические методы поисков и разведки месторождений : учеб. пособие / А.С. Егоров, В.В. Глазунов, А.П. Сысоев. – СПб. : Санкт-Петербургский горный университет, 2016. – 276 с.

31. Исследование призабойной зоны / К. Аулия [и др.] // Нефтегазовое обозрение. – 2002. – Т. 7. – Вып. 2. – С. 4–31.

32. Ладенко А.А. Геофизические исследования скважин на нефтегазовых месторождениях : учеб. пособие / А.А. Ладенко, О.В. Савенок. – М., Вологда : Издательство «Инфра-Инженерия», 2021. – 260 с.

33. Даниленко В.Н. Магнитоимпульсная дефектоскопия – толщинометрия нефтегазовых скважин / В.Н. Даниленко, А.П. Потапов // Вести газовой науки. – 2014. – № 4(20). – С. 188–195.

34. Каган К.Г. Опыт применения современных методов гидродинамических исследований скважин в открытом стволе / К.Г. Каган, А.Ю. Самойленко // Актуальные проблемы нефтегазовой отрасли: Сборник докладов научно-практических конференций журнала «Нефтяное хозяйство». – 2019. – С. 188–196.

35. Геофизические исследования и работы в скважинах : учеб. пособие / В.В. Попов [и др.]. – Новочеркасск : Издательство «Лик», 2017. – 326 с.

36. Асфандияров Х.А. Нефтегазопроявления и открытые фонтаны при эксплуатации скважин / Х.А. Асфандияров, Р.А. Максутов. – М. : Недра, 1986. – 231 с.

37. Лаломов Д.А. Оценка коэффициента фильтрации песчано-глинистых грунтов на основе совместной интерпретации данных методов сопротивления и георадиолокации / Д.А. Лаломов, В.В. Глазунов // Записки Горного института. – 2018. – Т. 229. – С. 3–12.

List of references:

1. Korotaev Yu.P. Transport and underground gas storage / Yu.P. Korotaev, A.I. Shirkovsky. – M. : Nedra, 1984. – 486 p.

2. RD 153-39.0-072-01. Technical instructions for conducting geophysical research and work with wireline instruments in oil and gas wells (date of introduction 07/01/2001).

3. Ipatov A.I. Geophysical and hydrodynamic control of hydrocarbon deposit development / A.I. Ipatov, M.I. Kremenetsky. – M., Izhevsk : Scientific Research Center «Regular and Chaotic Dynamics», 2010. – 780 p.

4. RD 153-39.0-109-01. Guidelines for the integration and phasing of geophysical, hydrodynamic and geochemical studies of oil and oil and gas fields (date of introduction 03/01/2002).

5. GOST 32358-2013 Oil and gas wells. Geophysical research and work in wells. General requirements.

6. Adaptability analysis and optimization of log suite for uncased wellbores of shale gas reservoirs: A case study of Sichuan Basin, China / Benke Shen, Ning Xia, Jun Li, Jing Lu, Song Hu, Xiang Ge, Zhiyuan Liu, Kun Liu, Qiangfu Kong // Energy Geoscience. – 2023. – Vol. 4. – Iss. 2. – P. 100–117.

7. Buddo I.V. Electromagnetic research using the 2D, 3D, 4D ZSB method: sequence of geological exploration work / I.V. Buddo, I.A. Shelokhov, N.V. Misyurkeeva, Yu.A. Agafonov // Geodynamics and tectonophysics. – 2021. – № 12(3S). – P. 715–730.

8. Klimov V.V. Increasing the reliability of geophysical methods in directional and horizontal wells / V.V. Klimov, O.V. Savenok, N.M. Leshkovich // Petroleum engineer. – 2017. – № 3. – P. 33–38.

9. Chepkasova E.V. Diagnosing the movement of gas-water contact using the results of gas-dynamic studies of wells / E.V. Chepkasova // Gas industry. – 2017. – № 5(752). – P. 42–45.

10. KSAT-RK5.76 // GeoSKAT: Scientific and Technical Center. – URL : http://geoskat.ru/views/KSAT-RK5-76/index.php (date of the application 03/13/2023).

8. Klimov V.V. Increasing the reliability of geophysical methods in directional and horizontal wells / V.V. Klimov, O.V. Savenok, N.M. Leshkovich // Petroleum engineer. – 2017. – № 3. – P. 33–38.

9. Chepkasova E.V. Diagnosing the movement of gas-water contact using the results of gas-dynamic studies of wells / E.V. Chepkasova // Gas industry. – 2017. – № 5(752). – P. 42–45.

10. KSAT-RK5.76 // GeoSKAT: Scientific and Technical Center. – URL : http://geoskat.ru/views/KSAT-RK5-76/index.php (date of the application 03/13/2023).

11. Zharikova N.Kh. Analysis of geophysical studies of wells and oil content of the Bazhenov formation in the Northern oil and gas condensate field / N.Kh. Zharikova, O.V. Savenok, L.G. Kusova // Science. Technique. Technologies (Polytechnic Bulletin). – 2023. – № 1. – P. 181–195.

12. Zakharchenko L.I. Geophysical methods for monitoring the development of mineral deposits: a textbook. – Stavropol: North Caucasus Federal University, 2017. – 250 p.

13. Kozhevnikova E.E. Fundamentals of field geology and development of oil and gas fields: educational and methodological manual. – Perm : Perm State National Research University, 2020. – 88 p.

14. Shepeleva I.S. Application of nuclear magnetic logging in a strong field for studying wells in the conditions of the Pripyat trough / I.S. Shepeleva // Bulletin of the State Technical University named after P.O. Sukhoi. – 2018. – № 3. – P. 12–17.

15. Domestic technology of high-field nuclear magnetic logging. State and development / S.S. Soshin [et al.] // Karotazhnik. – 2021. – Iss. 6 (312). – P. 112–123.

16. Experience in using nuclear magnetic logging to study gas deposits / A.V. Malinin [et al.] // Logger. – 2019. – Iss. 4 (298). – P. 30–42.

17. Patent for invention RU 2679630 C1. Method of nuclear magnetic logging and device for its implementation / V.D. Skirda, A.S. Alexandrov, D.L. Melnikova, M.M. Doroginitsky, O.I. Gnezdilov, V.M. Murzakaev, A.V. Bragin. Registered 02/12/2019.

18. Dyakonov D.I. General course of geophysical well research: textbook for universities / D.I. Dyakonov, E.I. Leontyev, G.S. Kuznetsov. – M. : Nedra, 1984. – 432 p.

19. Klimov V.V. Fundamentals of geophysical research in the construction and operation of wells in oil and gas fields: textbook / V.V. Klimov, O.V. Savenok, N.M. Leshkovich. – Krasnodar : Publishing House – South LLC, 2016. – 274 p.

20. Kutyrev E.F. On the issue of interpretation of radiogeochemical anomalies in production wells of Western Siberia / E.F. Kutyrev // Georesursy. – 2008. – № 5. – P. 14–18.

21. Nuclear geophysical methods in the modification of carbon-oxygen and three-probe pulsed neutron spectrometric logging / R.G. Gainetdinov [et al.] // Exposition Oil Gas. – 2013. – P. 17–20.

22. Geophysics : textbook / V.A. Bogoslovsky [et al.]. – M. : Publishing house «KDU», 2018. – 320 p.

23. Golovin B.A. Control over the development of oil and gas fields using geophysical methods : textbook / B.A. Golovin, M.V. Kalinnikova, A.A. Fly. – Saratov : Saratov State University named after N.G. Chernyshevsky, 2011. – 63 p.

24. Dmitriev A.Yu. Repair of oil and gas wells : textbook. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2016. – 272 p.

25. Ivakin B.N. Acoustic method of well testing / B.N. Ivakin, E.V. Karus, O.A. Kuznetsov. – M. : Nedra, 1978. – 320 p.

26. Gorodnov A.V. Reservoir assessment based on wave acoustics data – new interpretation possibilities / A.V. Gorodnov, V.M. Dobrynin, V.N. Chernoglazov // Geophysics. – 2000. – № 2. – P. 27–33.

27. Ilyina G.F. Field geophysics: textbook. – Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2004. – 122 p.

28. Klimov V.V. New technical means, technologies and methodology for geological and geophysical monitoring of the technical condition of the support of gas and gas condensate wells, including wells with abnormally high formation pressures and temperatures / V.V. Klimov, O.V. Savenok, A.V. Kuzmin // Oil. Gas. Innovations. – 2013. – № 3(170). – P. 33–37.

29. Abdykarimova V.S. Analysis of a complex of geophysical surveys of wells used in the study of exploration wells at the Karamandybas field / V.S. Abdykarimova // Young scientist. – 2020. – № 15(305). – P. 22–25.

30. Egorov A.S. Geophysical methods of prospecting and exploration of deposits : textbook / A.S. Egorov, V.V. Glazunov, A.P. Sysoev. – SPb. : St. Petersburg Mining University, 2016. – 276 p.

31. Study of the bottomhole zone / K. Aulia [et al.] // Oil and Gas Review. – 2002. – Vol. 7. – Iss. 2. – P. 4–31.

32. Ladenko A.A. Geophysical exploration of wells in oil and gas fields: textbook / A.A. Ladenko, O.V. Savenok. – M., Vologda: Publishing House «Infra-Engineering», 2021. – 260 p.

33. Danilenko V.N. Magnetic pulse flaw detection – thickness measurement of oil and gas wells / V.N. Danilenko, A.P. Potapov // News of Gas Science. – 2014. – № 4(20). – P. 188–195.

34. Kagan K.G. Experience in using modern methods of hydrodynamic testing of wells in an open hole / K.G. Kagan, A.Yu. Samoilenko // Current problems of the oil and gas industry: Collection of reports of scientific and practical conferences of the journal «Oil Industry». – 2019. – P. 188–196.

35. Geophysical research and work in wells : textbook / V.V. Popov [et al.]. – Novocherkassk : Lik Publishing House, 2017. – 326 p.

36. Asfandiyarov Kh.A. Oil and gas shows and open fountains during well operation / Kh.A. Asfandiyarov, R.A. Maksutov. – M. : Nedra, 1986. – 231 p.

37. Lalomov D.A. Estimation of the filtration coefficient of sandy-clayey soils based on the joint interpretation of data from resistance and ground penetrating radar methods / D.A. Lalomov, V.V. Glazunov // Notes of the Mining Institute. – 2018. – Vol. 229. – P. 3–12.