



Поляченко Л. Б.
канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер
лабораторий физико-математического
моделирования ООО «ИНТ «ГеоСпектр»
info@int-geos.ru



Поляченко А. Л.
д-р физ.-мат. наук, профессор,
академик РАН, Научный
руководитель ООО «ИНТ «ГеоСпектр»
info@int-geos.ru



Егурцов С.А.
Президент, Председатель Совета
директоров ООО «ИНТ «ГеоСпектр»
S_Egurtsov@int-geos.ru



Иванов Ю.В.
канд. тех. наук, исполнительный
директор ООО «ИНТ «ГеоСпектр»
y_ivanov@int-geos.ru



Меньшиков С.Н.
канд. экон. наук,
Член Правления, начальник
Департамента ПАО «Газпром»
gazprom@gazprom.ru



Ахмедсафин С.К.
канд. тех. наук,
Заместитель начальника
Департамента ПАО «Газпром»
S.Akhmedsafin@adm.gazprom.ru



Кирсанов С.А.
канд. тех. наук, Начальник
Управления ПАО «Газпром»
S.Kirsanov@adm.gazprom.ru

НОВЫЙ МЕТОД НЕЙТРОННОЙ ЦЕМЕНТОМЕТРИИ ННК-Ц ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБЫЧНОГО И ЛЁГКОГО ЦЕМЕНТА В СКВАЖИНАХ ЛЮБОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ВОЗРАСТА И ЗАПОЛНЕНИЯ

Стратегия национальной безопасности РФ указывает, что «...лидерство в развитии науки и технологий становится одним из ключевых факторов ... обеспечения национальной безопасности». И одним из главных условий устойчивого и эффективного функционирования наших нефтяной и газовой отраслей является развитие их научно-технологического потенциала, в т.ч. разработка и применение отечественных инновационных технологий получения и анализа геолого-геофизических данных с максимальной цифровизацией процессов их обеспечения. В статье представлен новый метод интегральной нейтрон-нейтронной цементометрии ННК-Ц для контроля состояния цемента любого типа и плотности (в т.ч. легкого), при любом заполнении скважин (в т.ч. газом), применимый на всех стадиях жизни скважин от их строительства до старых скважин, и свободный от известных серьезных ограничений традиционных методов ГГК-Ц и АКЦ. Физически ННК-Ц основан на контрастности по водородосодержанию между цементным камнем и флюидами в затрубном пространстве. Научные основы, методика и программно-интерпретационное обеспечение ННК-Ц разработаны с помощью математического моделирования. Метод тестирован и опробован путем сопоставления с данными ГГК-Ц с приборами СГДТ в 10 скважинах.

Ключевые слова: метод нейтрон-нейтронной цементометрии ННК-Ц, физические и научные основы, математическое моделирование, сравнение с традиционными методами, тестирование, методика, опробование.

Сравнение ННК-Ц с традиционными методами цементометрии. Место ННК-Ц в контроле цементирования строящихся скважин НГКМ и оценке состояния цемента в зрелых и старых скважинах

Наиболее широко распространенный в скважинной геофизике метод гамма-гамма цементометрии ГГК-Ц с приборами ряда СГДТ физически основан на эффекте плотностной контрастности – существенном превышении плотности цементного камня $\rho_{\text{Цем}}$ над плотностью вытесненной им скважинной жидкости $\rho_{\text{ж}}$, причем примерно не менее чем на 0.4г/см^3 . Таким образом, ГГК-Ц неприменим при $\rho_{\text{Цем}} < \rho_{\text{ж}} + 0.4 \approx 1.3\text{--}1.7\text{г/см}^3$, если принять максимальный диапазон плотностей жидкости $\rho_{\text{ж}} \approx 0.9\text{--}1.3\text{г/см}^3$.

Метод акустической цементометрии (АКЦ), как с отечественными приборами типа АКЦ [1,2], так и с аппаратурой Шлюмберже типа DSLT, USIT, IST [3], физически основан на регистрации акустических характеристик среды в звуковом и ультразвуковом диапазоне, что позволяет фиксировать прежде всего сцепления цементного камня с колонной и в меньшей степени с породой, а также наличие или отсутствие цементного камня и на качественном уровне степень его разрушенности.

Оба метода, ГГК-Ц и АКЦ, в современном приборном исполнении позволяют с высокой точностью изучать качество цементирования скважин на этапе их строительства и капитального ремонта. Однако, учитывая физику методов и массогабаритные характеристики данных скважинных приборов, даже такие высокотехнологичные инструменты не лишены недостатков, которым можно отнести:

1. Область применения данных методов ограничена скважинами с извлеченными НКТ и заполненными жидкостью, при этом исключается возможность их применения в скважинах, заполненных газом или газожидкостной смесью малой либо неоднородной плотности, что типично на газоконденсатных объектах.

2. Они неприменимы (за исключением изоляционного сканера IST) при использовании цементов с пониженной плотностью, обычно при $\rho_{\text{Цем}} < 1.4\text{г/см}^3$; это означает, что они неприменимы для всех марок лёгких и облегченных цементов ($\rho_{\text{Цем}} < 1.4\text{--}1.6\text{г/см}^3$), а применимы только для обычных ($\rho_{\text{Цем}} \approx 1.75\text{--}1.95\text{г/см}^3$) и утяжеленных ($\rho_{\text{Цем}} \approx 2\text{--}2.2\text{г/см}^3$) типов цемента.

3. Для корректной оценки цемента эти методы требуют учета пористости K_p и насыщения пород-коллекторов $K_{\text{нг}}$, которые также влияют на показания зондов цементометрии, и которые желательнее получать теми же физическими методами и в той же спускоподъемной операции (СПО). Однако K_p и $K_{\text{нг}}$ достоверно известны далеко не

всегда, но даже когда они известны, то измеряются в другой СПО и другими приборами, работающими «на пласт», что усложняет технологию этих видов цементометрии в целом, требует увязки по глубине каротажных кривых в обеих СПО, комплексной интерпретации их данных, и в итоге снижает достоверность результатов.

4. Применение приборов акустической цементометрии кроме вышеперечисленных недостатков имеют высокие требования к подготовке ствола скважин к проведению ГИС в части очистки внутренней поверхности стенки эксплуатационной колонны и однородности жидкости глушения, что влечёт за собой существенное увеличение затрат времени и стоимости подготовительных работ.

При поддержке ПАО «Газпром» Институтом нефтегазовых технологий «ГеоСпектр» в рамках развиваемой технологической платформы мультиметодный многозондовый нейтронный каротаж (ММНК), предложен, разработан и опробован новый метод интегральной нейтрон-нейтронной цементометрии – ННК-Ц для контроля состояния цемента любого типа и плотности, при любом заполнении скважин (жидкостью, газом, смесью), применимый на всех стадиях жизни скважин от их строительства до старых скважин, а также свободный от указанных недостатков 1-4 классических методов ГГК-Ц и АКЦ.

ННК-Ц реализуется теми же двухзондовыми установками нейтронного каротажа 2ННКт и/или 2ННКнт, которые входят в приборы ряда ММНК, работающие «на пласт», с использованием тех же данных измерений, но обрабатываемыми по другим алгоритмам. Отсюда вытекает еще одно важное технологическое преимущество реализующего его аппаратурно-методического комплекса (АМК) ММНК: за одну спускоподъемную операцию этот АМК позволяет исследовать одновременно и пласт, и цемент, в то время, как и ГГК-Ц, и АКЦ для этого нужно по два СПО с двумя разными приборами [1,2].

Еще одно достоинство ННК-Ц по сравнению с ГГК-Ц и АКЦ [1,2] состоит в том, что этот алгоритм оценки цемента не требует знания пористости K_p и нефтегазонасыщения $K_{\text{нг}}$ пласта, которые бывают известны плохо или неизвестны, внося определенную ошибку в оценку состояния цемента.

Перечисленные выше качества характеризуют ННК-Ц как потенциально наиболее универсальный метод цементометрии интегрального типа.

Необходимо отметить, что поскольку предложенный метод ННК-Ц использует радионуклидные источники, изотропно излучающие быстрые нейтроны, в настоящее время он может быть реализован, только в интегральном варианте, т.к. реализация им азимутальной развертки для

изучения распределения цемента по периметру на практике пока невозможна из-за высокой проникающей способности быстрых нейтронов и трудности их коллимации. Данное ограничение снижает детальность исследований метода ННК-Ц относительно акустических методов, но позволяет его использовать на безальтернативной основе в условиях действующих скважин НГКМ, без их глушения и извлечения НКТ.

Результатом ННК-Ц служит цементограмма объемной доли цементного камня C_{em} (в долях или %) от всего затрубного пространства в каждом кванте глубины протяженностью 10 или 20 см. Величина C_{em} является интегральным показателем степени целостности цемента, а величина $(1-C_{em})$ – интегральным показателем разрушенности цемента или доли его изначального отсутствия при цементировании.

Метод ННК-Ц решает задачу контроля качества цементации строящихся скважин и задачу оценки состояния цементного камня в зрелых и старых скважинах. Это две разные задачи и по смыслу, и по постановке. Качество цементирования строящихся скважин оценивается сразу после их крепежа, когда измерения проводятся в скважине с промывочной жидкостью, а в прискважинной зоне пласта (ПЗП) в пределах глубинности НК поровое пространство пласта еще заполнено фильтратом бурового раствора (ФБР). В зрелых и старых скважинах нужно оценивать состояние цементного кольца при любом текущем заполнении скважин (газ/жидкость/смесь), когда зона проникновения ФБР давно расформировалась и ПЗП может быть заполнена любым флюидом, в т.ч. с переменной по радиусу насыщенностью вследствие техногенных нарушений и воздействий за историю скважины.

Для решения задачи оценки качества цементирования в условиях скважин действующего эксплуатационного фонда метод ННК-Ц является более предпочтительным не только по экономическим соображениям, но и потому, что только в режиме работающей (не заглушенной) скважины возможно более достоверно решать задачи, связанные с выявлением межколонных и межпластовых перетоков флюидов по зазорам и пустотам цементного камня. После глушения скважин процессы перетоков их последствий, в том числе межколонные давления не проявляются и выявление причин их появления, как правило, невозможно. Кроме того, состояние цементного камня в ПЗК бывает причиной снижения проектных показателей по добыче и выявление данных фактов также возможно только в естественных условиях пласта, без влияния на ПЗК жидкости глушения.

Ниже рассматриваются основные аспекты ННК-Ц как метода ГИС.

Физические основы метода нейтронной цементометрии ННК-Ц

Физической основой нейтрон-нейтронной цементометрии ННК-Ц является значительная контрастность по водородосодержанию W между цементным камнем с $W_{цем} \approx 0.4$ и флюидами в затрубном пространстве, находившимися там или попавшими туда из пласта, водородосодержание которых $W_{фл}$ обычно сильно отличается от цементного $W_{цем}$. Из-за этого эффект некачественности цементного кольца, т.е. заполненных флюидами пустот в нем, заметно меняет среднее водородосодержание затрубного пространства скважины $W_{затр}(C_{em})$ в зависимости от доли цемента C_{em} в нем, или от доли заполненных флюидом пустот $(1-C_{em})$ в нем. А величина и изменения среднего водородосодержания затрубной зоны скважины $W_{затр}(C_{em})$ уверенно фиксируются нейтронными зондами ННК благодаря их высокой чувствительности к изменению концентрации водорода в любой из зон системы «скважина-пласт», в данном случае – затрубья.

В строящихся скважинах флюид в затрубном пространстве – промывочная жидкость с $W_{пж} \approx 1$, оставшаяся там в местах некачественного цементации. В зрелых и старых скважинах этот флюид – пластовая вода с $W_{вод} \approx 1$ или газ из пласта с $W_{газ} \approx 0.01-0.05$, и оба этих флюида могут заполнять трещины и пустоты в разрушающемся цементном камне (здесь и ниже водородосодержание всех зон и веществ выражаются, как обычно, в единицах водородосодержания пресной воды, принимаемой за 1).

Контрастность по водородосодержанию в паре цемент-флюид, равная разности $\Delta W_{фл} = W_{цем} - W_{фл}$, для вышеперечисленных флюидов (промывочной жидкости, пластовой воды и газа) имеет примерно следующие значения:

$$\Delta W_{пж} \approx \Delta W_{вод} \approx -0.6; \Delta W_{газ} \approx +0.37$$

Таким образом, она всегда является большой по абсолютной величине, а для жидкостей и газов $\Delta W_{фл}$ имеет еще и разные знаки. Оба эти свойства водородной контрастности $\Delta W_{фл}$ – большая величина $|\Delta W_{фл}|$ и смена знака при переходе от жидкости к газу – благоприятны для метода ННК-Ц, т.к. увеличивают его чувствительность и надежность определения доли цемента C_{em} .

Если цемент замещает промывочную жидкость с $W_{пж} \approx 1$ (или в него внедряется пластовая вода с $W_{вод} \approx 1$), то среднее водородосодержание затрубного пространства скважины $W_{затр}(C_{em})$ при объемной доле C_{em} в нем приближенно равно

$$W_{затр}(C_{em}) \approx C_{em} \cdot W_{цем} + (1 - C_{em}) W_{пж} \approx W_{пж} + \Delta W_{пж} \cdot C_{em} \approx 1 - 0.6 C_{em} \quad (1)$$

Это означает, что фактически измеряемое среднее водородосодержание затрубья $W_{затр}(Cem)$ с ростом доли цемента Cem в затрубье от 0 до 100% линейно уменьшается с высоким коэффициентом чувствительности, равным контрастности $\Delta W_{пж} \approx -0.6$. При этом водородосодержание затрубья падает от $W_{затр}(0) \approx W_{пж} \approx 1$ до $W_{затр}(100\%) \approx W_{цем} \approx 0.4$, обеспечивая хорошую максимальную дифференциацию в 2.5 раза. Показания зондов ННК при этом существенно возрастают.

Если в цемент внедряется газ из пласта с типовым водородосодержанием $W_{газ} \approx 0.03$, то среднее водородосодержание затрубья $W_{затр}(Cem)$ с объемной долей Cem в нем примерно равно

$$W_{затр}(Cem) \approx Cem \cdot W_{цем} + (1 - Cem) W_{газ} \approx W_{газ} + \Delta W_{газ} \cdot Cem \approx 0.03 + 0.37 Cem \quad (2)$$

Это значит, что в газоносных пластах происходит всё наоборот: измеряемое водородосодержание затрубья $W_{затр}(Cem)$ с ростом доли цемента в нем Cem от 0 до 100% линейно увеличивается с хорошим коэффициентом чувствительности, равным контрастности $\Delta W_{газ} \approx +0.37$. При этом водородосодержание затрубья резко меняется от $W_{затр}(0) \approx W_{газ} \approx 0.03$ до $W_{затр}(100\%) \approx W_{цем} \approx 0.4$, т.е. в 13 раз. Показания зондов ННК при этом значительно уменьшаются.

Описанное выше поведение среднего водородосодержания затрубного пространства $W_{затр}(Cem)$ и показаний ННК при заполнении пустот в цементном кольце жидкостью или газом позволяет решить обратную задачу по оценке показателя его целостности Cem . Потенциал ННК-Ц при использовании большего числа нейтронных зондов разных типов содержит возможность определить также и тип флюида, внедрившегося в цемент, и тем самым характер насыщения ПЗП.

Обращаем внимание на следующую важную физическую особенность метода ННК-Ц. При изменении доли цемента Cem в затрубье за счет внедрения в него флюидов меняется не только среднее водородосодержание затрубного пространства $W_{затр}(Cem)$, но и его средняя плотность $\rho_{затр}(Cem)$, на чем основана цементометрия ГГК-Ц. Однако в отличие от ГГК-Ц вариации плотности $\rho_{затр}(Cem)$ влияют на показания ННК-Ц настолько слабо и по абсолютной величине, и по сравнению с водородосодержанием $W_{затр}(Cem)$, что ими оказалось возможным фактически пренебречь. Это доказано точными расчетами прямых задач ННК-Ц для разнообразных геолого-технических условий (ГТУ) с помощью математического моделирования.

Приведем лишь один пример. Пусть при цементации буровой раствор/ПЖ с плотностью 1 г/см^3

замещается облепченным цементом одинаковой с ним плотности 1 г/см^3 , т.е. средняя плотность затрубного пространства $\rho_{затр} = \text{const} = 1 \text{ г/см}^3$ и не меняется с увеличением доли цемента Cem в нем с 0 до 100%. Тем не менее по расчетам показания разных зондов 2ННКт и 2ННКт при этом возрастают в 2.5-3 раза, что может происходить только из-за уменьшения среднего водородосодержания затрубья $W_{затр}(Cem)$. При этом одно уменьшение плотности исходного цементного камня $\rho_{цем}$ во всем интервале от тяжелого $\sim 2 \text{ г/см}^3$ до легкого $\sim 0.9 \text{ г/см}^3$ приводит лишь сравнительно к незначительному росту чувствительности ННК к показателю Cem . Это означает, что выделять и оценивать Cem в скважинах с облепченным цементом несколько легче, чем с обычным и тяжелым цементом. Причина этого в том, что скорость изменения среднего водородосодержания заколонного пространства $W_{затр}(Cem)$ равна контрастности водородосодержаний обеих сред $|\Delta W_{ж}| = W_{ж} - W_{цем}(Cem, \rho_{цем})$, которая тем больше, чем легче цемент, т.к. концентрация водорода в цементе пропорциональна его плотности.

Теоретическая разработка метода ННК-Ц

Обоснование возможностей и разработка алгоритмов количественной оценки объемной доли цемента Cem в затрубном пространстве скважин методом ННК-Ц производилось на основе математического моделирования показаний зондов 2ННКт и 2ННКт аппаратуры ряда ММНК методом Монте-Карло по программе MCNP5 [4] и сеточно-многогрупповым методом по программе POLE [5]. Были рассмотрены два типа заполнения затрубного пространства, не занятого цементным камнем, – жидкостью (ПЖ или пластовая вода) и газом. Сначала метод ННК-Ц был разработан чисто теоретически на основе обширных расчетов показаний 2ННКт и 2ННКт с различным набором длин зондов, которые охватили широкий круг геолого-технических условий (ГТУ):

- скважины, эксплуатационные колонны и насосно-компрессорные трубы (НКТ) различных диаметров и толщин, в геометриях с НКТ и без нее;
- различные заполнения скважины – газом, промысловой жидкостью и (в небольшом объеме) газовой смесью;
- максимально широкий интервал пористостей пласта $K_p = 0-40\%$;
- газо- и водонасыщенные пласты с коэффициентами газонасыщенности в максимальном диапазоне K_g от 0 до 1;
- интервал изменения минерализации пластовой воды $S_{пл} = 0-250 \text{ г/л}$;
- цементные камни с плотностью в интервале $\rho_{цем} = 0.9-2 \text{ г/см}^3$, охватывающие все типы лёгких, облепченных и обычных цементов;

– объемная доля цемента C_{em} в затрубном пространстве скважин менялась в максимальном диапазоне $C_{em}=0-100\%$;

– были исследованы 2 типа заполнения затрубья, не занятого цементом, – жидкостью (ПЖ или пластовая вода) и газом.

Как известно, зонды ННК весьма чувствительны к водонасыщенной пористости K_p и газонасыщенности K_g пласта, а к состоянию цемента в меньшей степени. Естественно, что в методе нейтронной цементометрии ННК-Ц именно вариации K_p и K_g пласта выступают одними из главных «помех». Поэтому при создании метода ННК-Ц одна из трудных задач состояла в нахождении (конструировании) таких функционалов от показаний зондов ММНК, чувствительность которых к объемному содержанию цемента C_{em} максимальна, а к параметрам пласта (K_p , K_g) – минимальна. Такое математическое преобразование (функционал) было найдено – это нормализация обратных показаний малого нейтронного зонда к большому, в результате которой нормализованные зонды совпадают при целом цементе и различаются при разрушенном/некачественном цементе, причем это положение сохраняется при всех значениях K_p и K_g пласта.

Пример эффективности этого преобразования приведен на **рис.1**, где показаны зависимости обратных показаний малого J_{mz} и большого J_{bz} зондов ННКт от K_p после нормализации малого зонда к большому при реше-

нии задачи оценки качества цементирования в строящихся скважинах.

На **рис.1** нормализованные кривые $1/J_{mz}$ норм и $1/J_{bz}$ практически совпадают при целом цементе $C_{em}=100\%$ (кривые 1 и 3) и существенно расходятся при полностью отсутствующем цементе $C_{em}=0$ (2 и 4), а при частичном разрушении цемента расхождение пропорционально величине C_{em} . Из графиков можно также увидеть еще одну важную особенность ННК-Ц: относительная разность кривых 2 и 4 приближенно постоянна и почти не зависит от K_p . Последнее позволяет ввести измеряемый функционал от показаний $Si[J_i]$, равный относительной разности нормализованных обратных показаний двух зондов 2ННК

$$Si = K1(1/J_{mz.норм} - 1/J_{bz}) / (1/J_{mz.норм} + 1/J_{bz}) \sim 1 - C_{em} \quad (3a)$$

который пропорционален показателю разрушенности/некачественности цементного камня ($1 - C_{em}$), не зависит или слабо зависит от K_p и K_g , меняется от 0 до 1 при изменении доли цемента C_{em} от целого ($C_{em}=100\%$) до отсутствующего ($C_{em}=0$). Константа $K1$ находится из расчетов Монте-Карло, она различна для разных приборов ММНК и разных ГТУ и готовится заранее.

Для некоторых условий, например, для больших диаметров скважин $D_{скв} \geq 243$ мм более подходящим функционалом Si , характеризую-

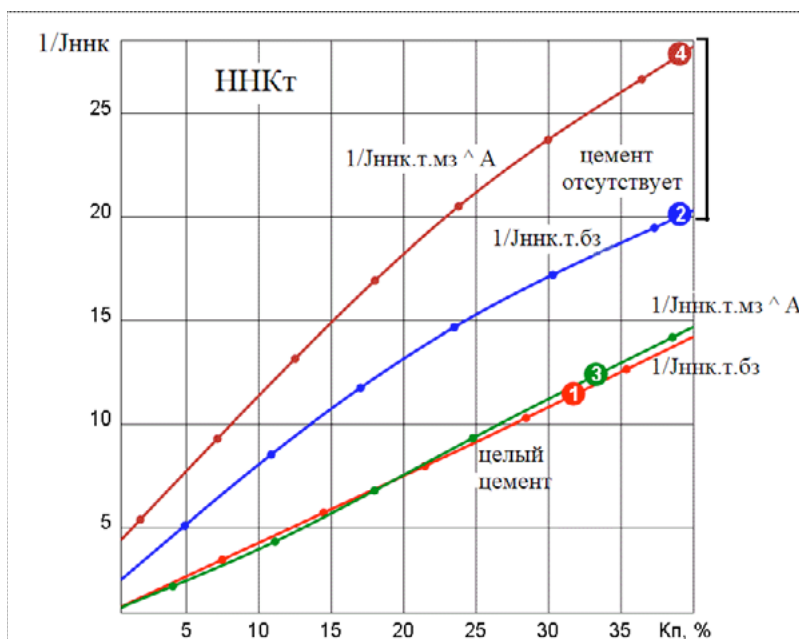


Рис. 1.

Теоретические зависимости обратных показаний малого и большого зондов ННКт от пористости K_p после нормализации малого зонда к большому. Решается задача оценки качества цементирования в новых строящихся обсаженных скважинах. Скважина $D_{скв}/D_{эк}/D_{нкт}=216/168/73$ мм, заполнена водой, плотность цементного камня за эксплуатационной колонной $1.8г/см^3$. Зависимости рассчитаны методом Монте-Карло (ниже индекс «ннк» в показаниях J опускается).

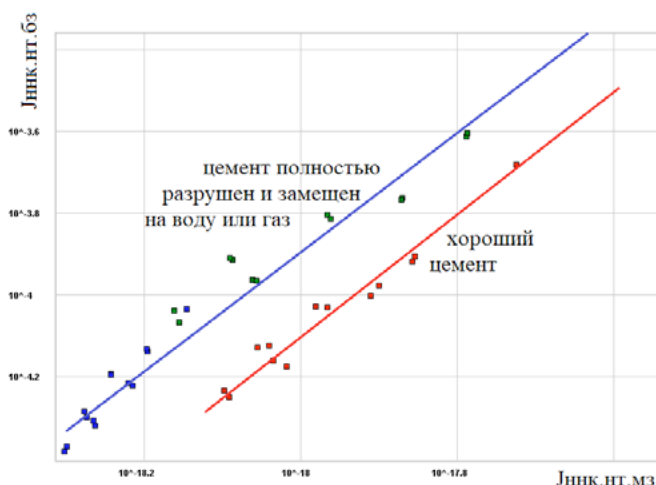


Рис. 2. Теоретический кросс-плот в координатах «скорость счета малого зонда Jнк.нт. мз – скорость счета большого зонда Jнк.нт. бз» в двойном логарифмическом масштабе, рассчитанный методом Монте-Карло для двухзондового прибора нейтронного каротажа по надтепловым нейтронам 2ННКнт.

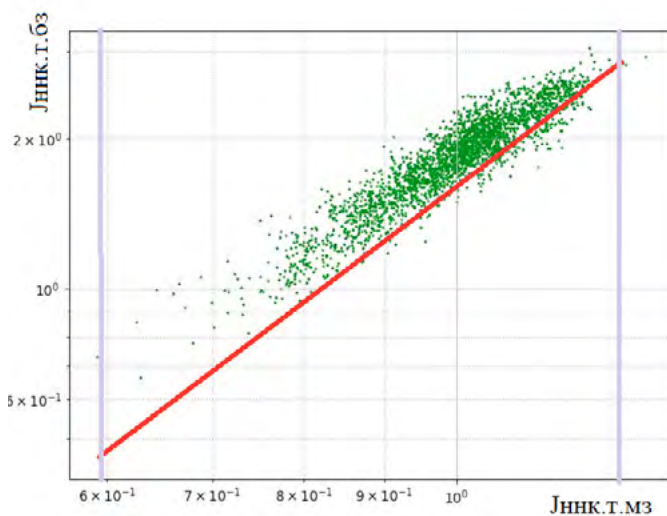


Рис. 3. Кросс-плот в координатах «скорость счета малого зонда Jт. мз – скорость счета большого зонда Jт.бз» в двойном логарифмическом масштабе, построенный по реальным измерениям в скважине двухзондовым прибором нейтронного каротажа по тепловым нейтронам 2ННКт.

щим разрушенность/некачество цемента (1-Cem) и также слабо зависящим от Kп и Kг, будет абсолютная разность нормализованных обратных показаний двух зондов ННК:

$$Si=K2 (1/Jмз. Норм-1/Jбз) (36)$$

Тогда искомый показатель целостности или объемной доли цемента в затрубье, Cem, %, выражается через функционал Si формулой:

$$Cem=(1-Si)100\% (4)$$

Для практического применения метода ННК-Ц необходимо знать, как в алгоритме интерпретации следует реализовать ключевую

операцию нормализации показаний малого и большого зондов 2ННК. На основе анализа обширных расчетов Монте-Карло было установлено, что нормализация математически должна представлять из себя возведение обратных показаний малого зонда в некоторую положительную степень α . Оказалось, что степень α зависит от класса ГТУ и от типа прибора ММНК. Находить α можно двумя способами: 1) точно и априори – путем расчета по Монте-Карло баз данных α (ГТУ) для требуемой области ГТУ, объемом от одной скважины до месторождения (в последнем случае это может быть очень трудоёмким);

2) приближенно и онлайн – кросс-плотным способом по измеренным данным 2ННК в исследуемом интервале данной скважины, что вполне оперативно.

На рис.2 приведен пример теоретического кросс-плота, рассчитанного методом Монте-Карло для зондов надтепловых нейтронов 2ННКнт прибора ряда ММНК, который построен в координатах «Jнт.мз-Jнт.бз» в двойном логарифмическом масштабе. Данный кросс-плот демонстрирует, что точки, соответствующие хорошему цементу, находятся приблизительно на одной прямой линии, которая описывается уравнением линейной регрессии в этих координатах:

$$\log Jbz = \alpha \log Jmz + B (5)$$

где угловой коэффициент α и есть искомая степень, в которую при нормализации надо возводить обратные показания малого зонда.

На рис.3 аналогичный кросс-плот построен по данным скважинных измерений двухзондовым прибором 2ННКт, тоже в координатах «Jт.Мз-Jт.бз» в двойном логарифмическом масштабе. На кросс-плоте нижняя касательная прямая линия соответствует хорошему состоянию цемента. По ней степень α определяется описанным выше способом.

Онлайн-нахождение степени α кросс-плотным способом обычно является приближенным, поскольку кросс-плот не всегда имеет определенную форму и/или не всегда содержит достаточное количество точек для однозначного построения касательной и вычисления α как ее углового наклона. Поэтому, если ГТУ в исследуемой скважине известны, то точнее определять искомую степень α априори расчетным способом. Но когда это по-какому-либо невозможно (нет времени, неизвестен ряд ГТУ или др.), допускается приближенное определение степени α по кросс-плоту.

После нахождения верного значения искомой степени α ключевая операция нормализации при обработке ННК-Ц выполняется путем возведения обратных показаний малого зонда $1/Jmz$ в эту степень α . Пример таким образом нормализованных каротажных кривых 2ННК, измеренных в реальной скважине, приведен на рис.4. По относительной

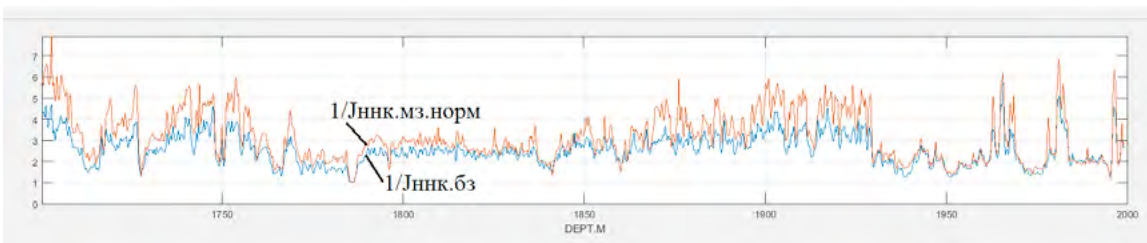


Рис. 4. Пример нормализованных кривых обратных скоростей счета малого и большого зондов тепловых нейтронов прибора 2ННКт.

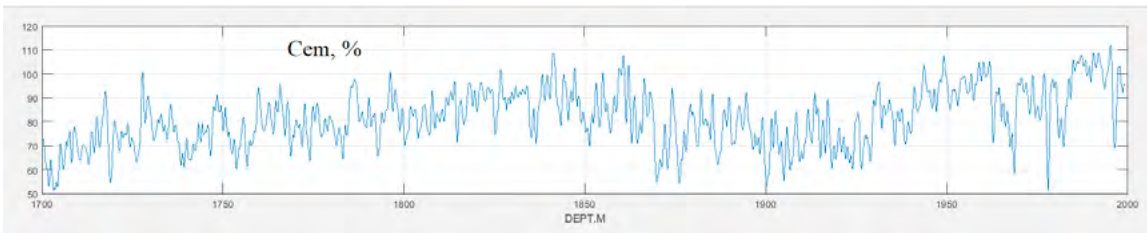


Рис. 5. Пример результата расчета целостности цемента Сем за эксплуатационной колонной с использованием двухзондового прибора 2ННКт. Кривая Сем соответствует кривым скоростей счета, изображенным на рис.4.

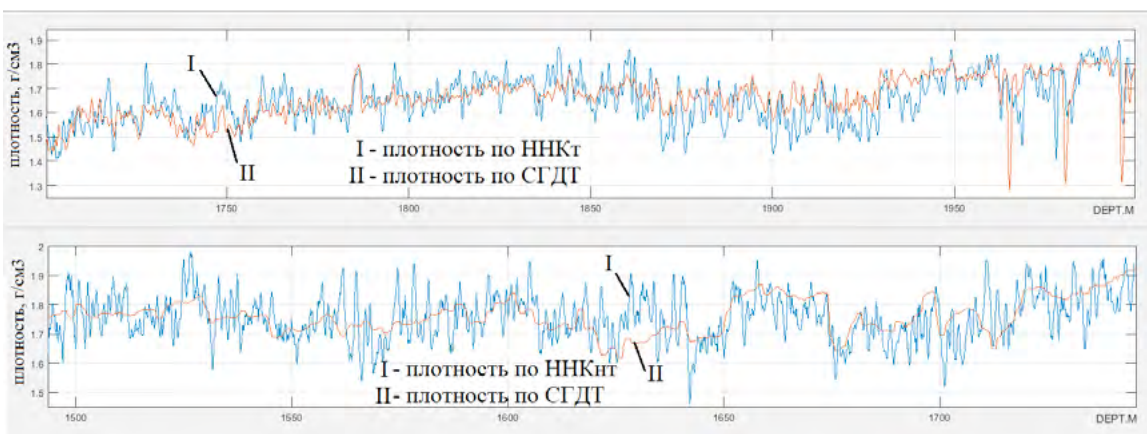


Рис. 6. Сопоставление кривых плотности заколонного пространства, полученных предложенным методом ННК-Ц (кривая I) и независимо по СГДТ (кривая II) при оценке степени разрушенности цемента в двух скважинах. Вверху показан результат по данным 2ННКт, внизу – по данным 2ННКнт. Скважины заполнены жидкостью.

разности Si этих кривых по формуле (4) рассчитывается целостность цемента Сем. Пример цементограммы скважины Сем(Н), полученной по кривым **рис.4**, приведен на связанном с ним **рис.5**.

Тестирование нейтронной цементометрии ННК-Ц

Алгоритм ННК-Ц был создан целиком на основе математического моделирования и теории, поэтому был выполнен комплекс работ по тестированию данными скважинных измерений. Для подтверждения разработанного метода ННК-Ц было проведено его сопоставление с результатами оценки качества цементирования классическим методом ГГК-Ц/СГДТ.

Выбор последнего объясняется двумя причинами. Во-первых, оба метода поквартирно опре-

деляют одну и ту же физическую величину – объемную долю цемента Сем в затрубном пространстве, только ГГК-Ц по его средней плотности, а ННК-Ц по его среднему водородосодержанию. Во-вторых, метод ГГК-Ц/СГДТ обеспечивает достаточно высокую точность оценки Сем, если выполнены условия его применимости: водонаполненные скважины и превышение плотности цемента над плотностью промывочной жидкости в затрубном пространстве не менее чем на 0.4г/см^3 , т.е. использование в основном обычных цементов.

Наиболее серьезную трудность при проведении тестирования ННК-Ц по данным ГГК-Ц/СГДТ вызвал поиск нужных скважин (их было просмотрено порядка сотни) по следующим причинам:

а) Очень мало скважин, где одновременно проводились измерения ГГК-Ц/СГДТ и ММНК/ННК-Ц.

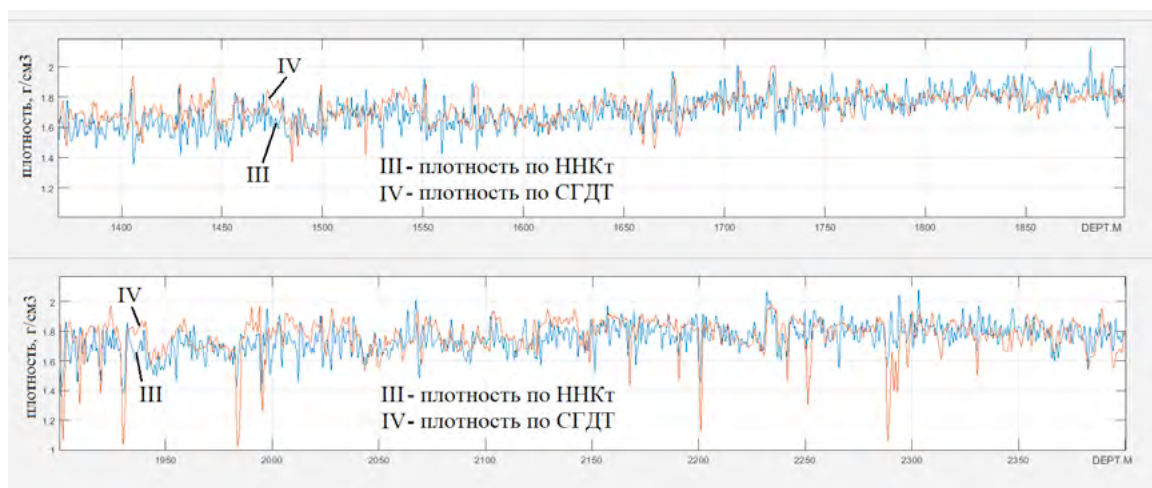


Рис. 7.

Сопоставление кривых плотности заколонного пространства, полученных предложенным методом ННК-Ц (кривая I) и независимо по СГДТ (кривая II) при оценке степени разрушенности цемента в двух скважинах. Оба результата ННК-Ц получены по данным 2ННКт в скважинах, заполненных газом. Оба результата СГДТ получены в тех же водозаполненных скважинах.

б) В старых скважинах измерения приборами СГДТ часто были проведены гораздо раньше, чем приборами ММНК с нужными для ННК-Ц зондами. Поэтому за прошедшее время цементное кольцо по сравнению с датой СГДТ могло дополнительно разрушиться, из-за чего тестирование ННК-Ц в этих скважинах могло быть не вполне корректным и могло занижать значения S_{em} .

в) Именно газонаполненные скважины представляют особый интерес для применения ННК-Ц, поскольку в них не работают никакие другие методы цементометрии, например, с приборами СГДТ, АКЦ, USIT. Но из-за того, что ГК-Ц в таких скважинах не проводится, очень трудно было найти для тестирования газонаполненные скважины, в которых ранее (при заполнении этих скважин водой) были проведены измерения СГДТ.

Тем не менее было найдено около десятка подходящих водозаполненных и газозаполненных обсаженных скважин, в которых было выполнено опробование и тестирование ММНК/ННК-Ц по данным традиционной цементометрии ГК-Ц/СГДТ. Некоторые примеры из них приведены на **рис.6 и 7**.

На **рис.6** демонстрируется достоверность результатов интерпретации предложенным методом ННК-Ц, которая подтверждается сопоставлением кривых плотности цементного камня, полученных независимо методом ННК-Ц (кривая I) и ГК-Ц/СГДТ (кривая II) при оценке степени разрушенности цемента в двух скважинах. Вверху показан результат ННК-Ц по данным зондов 2ННКт, внизу – зондов 2ННКнт. Скважины заполнены жидкостью. Верхняя часть **рис.6** соответствует кривым на **рис.4-5**.

На **рис.7** демонстрируется достоверность результатов ННК-Ц в газозаполненных скважинах, подтверждаемая сопоставлением кривых плотности цементного камня, независимо полученных предложенным методом ННК-Ц с помощью прибора 2ННКт (кривые III) в газозаполненных скважинах и методом ГК-Ц/СГДТ (кривые IV) в тех же водозаполненных скважинах.

Выводы

Предложен, разработан и опробован новый метод интегральной нейтрон-нейтронной цементометрии ННК-Ц для контроля состояния цемента любого типа и плотности, при любом заполнении скважин (жидкостью, газом, смесью), применимый на всех стадиях жизни скважин от их строительства до старых скважин и обладающий следующими свойствами:


1. Метод реализуется, в зависимости от геолого-технических условий измерений, с приборами 2ННКт или 2ННКнт.
2. Метод работает с любыми типами цементов, включая лёгкие и обычные.
3. Метод применим для широкой номенклатуры диаметров скважин, эксплуатационных колонн и насосно-компрессорных труб (НКТ), применяющихся на практике, в скважинах с НКТ и без НКТ.
4. Заполнение скважины может быть любое: газ, любая жидкость или их смеси.
5. Метод не требует трудоемкой работы по созданию обширных баз данных палеточных зависимостей, что упрощает решение задачи цементометрии.
6. Метод работает в максимальном диапазоне пористостей $K_p=0-40\%$; при этом знание величины K_p для оценки цемента не требуется,

что значительно упрощает решение задачи цементометрии.

7. Метод работает в пластах с любым характером насыщенности: нефть, вода, конденсат, газ или их смеси, и практически для любых реально встречающихся коэффициентах нефтегазонасыщения K_{ng} , кроме самых высоких $K_{ng} \geq 0.75-0.8$, при этом метод не требует знания величины K_{ng} , что значительно упрощает решение задачи цементометрии. Очень высокие K_{ng} являются помехой, несколько искажающей результат.

8. Метод решает задачу контроля качества цементирования новых строящихся скважин с использованием любой аппаратуры ряда ММНК, в т.ч. наиболее распространенных в РФ монометодных двухзондовых приборов 2ННКт или 2ННКЦ.

9. Задача оценки разрушенности цемента в зрелых и старых скважинах лучше решается приборами по надтепловым нейтронам 2ННКт, которые работают в любых ГТУ, включая высокоминерализованные пластовые воды или газонаполненные скважины. Но и более распространенные приборы по тепловым нейтронам 2ННКЦ, здесь также применимы, хотя и в несколько более ограниченной области ГТУ, т.к. они имеют заметно меньшую чувствительность к цементу.

10. Достоверность результатов метода ННК-Ц подтверждена сопоставлением результатов обработки данных 2ННКт и 2ННКЦ в водонаполненных и газонаполненных скважинах с результатами традиционной цементометрии ГГК-Ц/СГДТ в этих же скважинах. 

Литература

1. Скважинная ядерная геофизика. Справочник геофизика, глава 10 / под. ред. О.Л. Кузнецова, А.Л. Поляченко. - 2-е изд. - М.: «Недра», 1990. - 318 стр.
2. Сковородников И.Г. Геофизические исследования скважин. - 3-е изд. - Екатеринбург: Институт испытаний, 2009. - 471 стр.
3. Сайт Шлюмберже [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.slb.ru> (дата обращения: 21.03.2022).
4. Los Alamos National Laboratory (LANL). X-5 Monte Carlo Team, i «MCNP - Version 5, Vol. I: Overview and Theory», LA-UR-03-1987 (2003). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://laws.lanl.gov/vhosts/mcnp.lanl.gov/pdf_files/la-ur-03-1987.pdf (дата обращения: 30.03.2021).
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021610817. Векторная программа для многогруппового сеточного моделирования полей, показаний и палеток методов ядерного каротажа в вертикальных и наклонно-горизонтальных скважинах (программа «POLE») / А.Л. Поляченко, И.В. Бабкин, Л.Б. Поляченко. Заявл. 25.12.2020, опубл. 19.01.2021.

UDC 550.832.535

L.B. Polyachenko, Candidate of Science (C.Sc.) in Physics & Mathematics, Lead Engineer, Physical & Mathematical Modelling Laboratory, OGTI GEO-SPECTRUM LLC, info@int-geos.ru

A.L. Polyachenko, Doctor of Science (D.Sc.) in Physics & Mathematics, Professor, Academician at RANS, Academic Advisor OGTI GEO-SPECTRUM LLC info@int-geos.ru

E.A. Egurtsov, President, Chairman of Board of Directors OGTI Geo-Spectrum LLC, S_Egurtsov@int-geos.ru

Yu.V. Ivanov, Candidate of Science (C.Sc.) in Engineering, Executive Director OGTI Geo-Spectrum LLC, y_ivanov@int-geos.ru

S.N. Menshikov, Candidate of Science (C.Sc.) in Economics, Member of the Management Board, Department Head PJSC Gazprom, gazprom@gazprom.ru

S.K. Akhmedsafin, Candidate of Science (C.Sc.) in Engineering, Department Deputy Head PJSC Gazprom, S.Akhmedsafin@adm.gazprom.ru

S.A. Kirсанov, Candidate of Science (C.Sc.) in Engineering, Department Head PJSC Gazprom, S.Kirsanov@adm.gazprom.ru

A NOVEL METHOD OF NEUTRON-NEUTRON CEMENT BOND LOGGING (NN-CBL) FOR REGULAR AND LIGHT CEMENT EVALUATION IN WELLS, IRRESPECTIVE OF THEIR FUNCTION, AGE, AND FILL-UP

Abstract: The national security strategy of the Russian Federation states that «...leadership in the advancement of science and technology is evolving as a key factor ... for provision of national security». The stable and effective functioning of the domestic oil and gas industries primarily relies on the development of their science and technology capacities, including origination and application of indigenous enabling technologies used to obtain and analyze the geological and geophysical data, with their supporting processes digitalized to the maximum extent possible. The article presents a novel method of integral neutron-neutron cement bond logging NN-CBL that is used to monitor cementing of any type and density (including light cementing) in wells filled with any media (including gas), applies in all the stages of well life – from construction to old wells, and is free of any known severe restrictions typical of the conventional GG-CBL and ACBL. Physically, NN-CBL has at its core the contrast difference by hydrogen content between the cement and fluids in the annulus. Scientific fundamentals, procedure, and supporting interpretation software for NN-CBL have been implemented with the aid of mathematical modelling. The method has been tested and proven by comparison of GG-CBL data obtained from SGDT tools in 10 wells.

Keywords: neutron-neutron cement bond logging NN-CBL, physical and scientific fundamentals, mathematical modelling, comparison with conventional methods, testing, procedure, proving.