

УДК 550.832

А. С. Зеленов, С. С. Сошин, С. Ю. Тарасов
ООО «Нефтегазгеофизика»

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АППАРАТУРЫ ЯДЕРНО-МАГНИТНОГО КАРОТАЖА В ИСКУССТВЕННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Описан комплекс метрологических средств и мероприятий, позволяющий обеспечить заявленные показатели точности аппаратуры ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле при определении петрофизических характеристик горных пород.

Ключевые слова: ядерно-магнитный каротаж, метрологическое обеспечение, калибровка.

Средства метрологического обеспечения геофизической аппаратуры являются обязательными для получения достоверных результатов измерений в скважинах. Метод ядерно-магнитного каротажа, не так давно вошедший в практику отечественных геофизических исследований, не составляет исключения. В этой связи разработка эффективных методик калибровки для новой аппаратуры имеет особое значение. В настоящий момент в ООО «Нефтегазгеофизика» разрабатываются и применяются специальные методики калибровки для аппаратуры ядерно-магнитного томографического каротажа (ЯМТК) в искусственном магнитном поле.

Метод ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле позволяет непосредственно определять коэффициент пористости горных пород [2, 14], при этом полученные результаты не зависят от литологии, что придает им особую ценность. Очевидно, что скважинная аппаратура ЯМТК должна обеспечивать определение пористости во всем рабочем диапазоне температур без превышения допускаемой для данного типа аппаратуры погрешности. В настоящее время в ООО «Нефтегазгеофизика» существует несколько модификаций скважинной аппаратуры данного типа. Это центрируемые приборы серии ЯМТК [7] с погрешностью измерения не более $\pm 1\%$ абсолютного значения пористости при трех накоплениях, прижимные приборы серии ЯМТК-П [8] с погрешностью не более $\pm 3\%$ пористости при шести накоплениях, а также автономные приборы серии

ЯМТК-А с погрешностью измерения не более $\pm 1\%$ пористости при трех накоплениях.

Существующие методики калибровки, применяемые для подобной аппаратуры, работающей в поле Земли, нацелены в основном на определение градуировочной зависимости показаний метода от индекса свободного флюида [11]. Однако, помимо определения характеристик пористости, метод ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле позволяет получать распределение коэффициента пористости в горной породе по временам поперечной релаксации T_2 . Для оценки метрологических характеристик аппаратуры подобного типа предлагается использовать ряд жидкостей с различными известными временами T_2 [3]. Но в случае со скважинной аппаратурой этот метод не применяется, поскольку в настоящее время получение эталонов большого объема с заданными характеристиками, при этом стабильных во времени, является крайне сложной задачей [1]. Помимо этого необходимо учитывать, что регистрируемое время поперечной релаксации в неоднородном магнитном поле зависит также от градиента магнитного поля и параметров импульсной последовательности [6, 12]. Таким образом, использование подобного ряда эталонов для оценки метрологических характеристик скважинной аппаратуры представляется нецелесообразным. По приведенным выше причинам была разработана специальная методика калибровки аппаратуры ядерно-магнитного каротажа в искусственном магнитном поле, описанная в данной работе. Основными отличительными особенностями предлагаемой методики являются оценка погрешности определения времен поперечной релаксации T_2 , а также контроль температурной погрешности аппаратуры и качества изготовления зонда ЯМТК при выпуске аппаратуры из производства.

Разработанная методика калибровки приборов ядерно-магнитного каротажа различного типа и программное обеспечение для ее осуществления позволяют не более чем за два часа провести калибровку аппаратуры ЯМТК с выдачей протокола в автоматическом режиме. Проведение метрологических мероприятий возможно не только на базе фирмы-изготовителя, но и в любых приспособленных для этого производственных помещениях, оснащенных соответствующим комплектом средств для калибровки аппаратуры ЯМТК.

Технические средства метрологического обеспечения

Для проведения комплекса метрологических мероприятий необходимо соответствующее техническое обеспечение. На рис. 1 показана разработанная в ООО «Нефтегазгеофизика» установка для проведения калибровки скважинной аппаратуры ЯМТК.

Установка представляет собой экранированный медными пластинами корпус, внутри которого находится бак, полностью заполненный калибровочной жидкостью (эталон), имитирующий пористость породы. Экранирование корпуса позволяет уменьшить электромагнитные помехи различного происхождения, которые наводятся на приемную радиочастотную катушку зонда прибора. Размеры экрана выбраны таким образом, чтобы обеспечить минимальное влияние его проводимости на характеристики зонда. Конструкция установки позволяет применять различные жидкости – эталоны для регистрации сигналов с использованием скважинной аппаратуры. В минимальный, необходимый для калибровки и настройки аппаратуры набор образцов входят дистиллированная вода (H_2O) и вода с искусственно



Рис. 1. Установка для проведения калибровки

укороченным с помощью раствора $MnCl_2$ временем релаксации. Для калибровки зонд прибора ЯМТК помещается в калибровочную установку в горизонтальном положении, прибор полностью собирается и подключается к регистратору.

Для определения метрологических характеристик аппаратуры в скважинных условиях предусматривается возможность прогрева прибора в процессе работы. На рис. 2 показана установка для моделирования скважинных температурных условий.

Для прогрева используется многосекционная печь, позволяющая нагревать как весь прибор, так и его части до необходимой температуры. В настоящий момент максимальная рабочая температура скважинных приборов в термостойкой модификации составляет 150 °С.



Рис. 2. Прибор в процессе прогрева. Используется одна секция печи

Калибровка аппаратуры ЯМК по значениям пористости

Первичными данными метода являются релаксационные кривые, амплитуда которых прямо пропорциональна коэффициенту общей пористости исследуемых горных пород [10, 14]. Данная зависимость является линейной, следовательно, и градуировочная характеристика аппаратуры в этом случае также линейна. Для калибровки аппаратуры подобного типа достаточно использовать два эталона, имитирующие

заданные коэффициенты пористости. Благодаря особенностям регистрации сигнала ядерно-магнитного резонанса в аппаратуре ЯМТК [5], а именно использованию двух каналов регистрации и применению прямой и альтернативной последовательностей, выходной сигнал аппаратуры равен нулю при нулевом значении измеряемого параметра и для калибровки достаточно одного эталона. С этой целью используется эталон, имитирующий 100% пористость, в качестве которого используется емкость, полностью заполненная дистиллированной водой.

Эталонная емкость помещается в калибровочную установку таким образом, чтобы сигнал, регистрируемый прибором, полностью формировался эталоном. Для этого зонд прибора должен полностью находиться внутри установки и быть строго центрирован относительно эталона. Процесс градуировки заключается в определении калибровочного коэффициента таким образом, чтобы амплитуда регистрируемой от эталона релаксационной кривой равнялась 100% пористости. При этом учитывается, что дистиллированная вода имеет достаточно большое время продольной релаксации T_1 , и чтобы калибровку провести корректно, необходимо выдерживать достаточные для затухания времена между последовательностями Карра-Парселла-Мейбум-Гилла (КПМГ). Поскольку на величину регистрируемого сигнала влияет температура окружающей среды, необходимо контролировать температуру в помещении и поддерживать ее в диапазоне от 18 до 25 °С. Программное обеспечение, используемое для калибровки скважинной аппаратуры, позволяет провести этот процесс в автоматическом режиме без участия оператора, что позволяет минимизировать субъективные факторы при проведении периодических метрологических мероприятий.

Как было сказано выше, регистрируемый сигнал должен быть равен нулю при нулевом значении измеряемого параметра (в нашем случае при нулевом значении коэффициента пористости), что определяется, в том числе, настроечными параметрами аппаратуры. Поэтому при проведении периодической калибровки аппаратуры, после ее ремонта или перенастройки, в первую очередь необходимо контролировать уровень сигнала при полном затухании сигнала ЯМР-релаксации.

С этой целью используется установка для калибровки приборов, в которую помещается эталонный образец с раствором MnCl_2 ,

имеющей крайне малое время поперечной релаксации T_2 (1–2 мс). Сигнал в этом случае практически полностью затухает уже после первых сигналов спин-эхо. Таким образом, используя затухший сигнал, удастся зарегистрировать релаксационные кривые, которые позволяют оценить сигнал аппаратуры при нулевом значении пористости – аппаратурную «нулевую линию». Для этого из полученной релаксационной кривой убирают несколько первых точек (сигналов спин-эхо), а по оставшимся точкам определяют среднее значение. Регистрация таких релаксационных кривых проводится в нескольких режимах с разными параметрами импульсной последовательности КПМГ. Всего для статистической обработки регистрируется не менее 500 релаксационных кривых каждого типа. Полученные в результате данные представляются в виде гистограмм смещения нуля. На рис. 3 приведена подобная гистограмма для настроенного прибора ЯМТК.

На гистограмме видно, что центральный пик распределения приходится на ноль, а разброс симметричен и не превышает 0,2 абс. % общей пористости. Это подтверждает, что калибровочная функция аппаратуры проходит через ноль, а систематическая погрешность при проведении калибровки аппаратуры исключается.

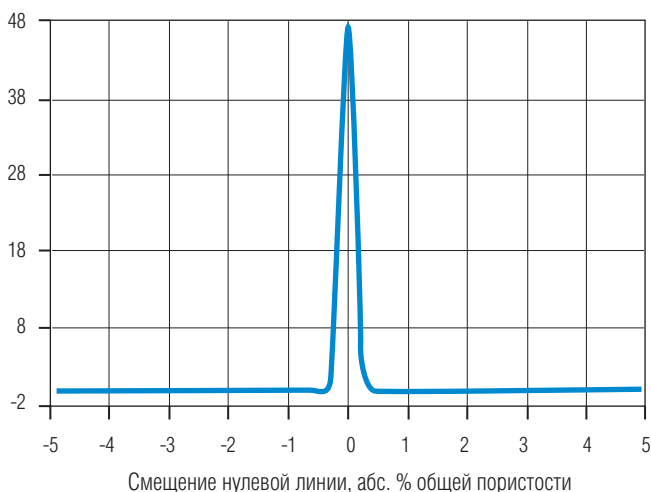


Рис. 3. Гистограмма смещения нулевой линии прибора серии ЯМТК

Калибровка аппаратуры ЯМК по временам поперечной релаксации T_2

Калибровка скважинной аппаратуры ЯМТК заключается в определении времени объемной релаксации T_0 для эталонного образца (дистиллированной воды) и последующем расчете по полученным данным градиента магнитного поля в зоне исследования. Расчетное значение градиента сравнивается с паспортным значением для данного прибора и на основании этого сравнения делается заключение о его работоспособности.

Определение градиента магнитного поля основано на соотношении [13]:

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{T_0} + \frac{D_w(\gamma \cdot G)^2}{12} \cdot T_E^2, \quad (1)$$

где T_2 – зарегистрированное время поперечной релаксации; T_0 – время объемной релаксации флюида (воды); D_w – коэффициент диффузии флюида (воды); γ – гиромагнитное отношение ядра (отношение магнитного момента к механическому); G – градиент магнитного поля; T_E – интервал между соседними 180-градусными радиоимпульсами в последовательности КПМГ.

Далее проводится серия измерений с разными интервалами между 180-градусными импульсами в последовательности КПМГ, а затем методом экспоненциальной регрессии определяется время поперечной релаксации для каждой зарегистрированной релаксационной кривой и по полученным данным строится зависимость, представленная на рис. 4.

Степень близости зависимости к линейной характеризует стабильность радиоимпульсов по частоте, фазе и амплитуде и оптимальность регистрации сигналов спин-эхо, что в целом свидетельствует о качестве настройки аппаратуры. При этом, исходя из соотношения (1), градиент магнитного поля равен тангенсу угла наклона полученной прямой, а время объемной релаксации для воды равно обратной величине, отсеченной этой прямой на оси ординат.

Рассчитанное таким образом время объемной релаксации используется для оценки точности регистрируемого аппаратурой ЯМТК времени поперечной релаксации T_2 .

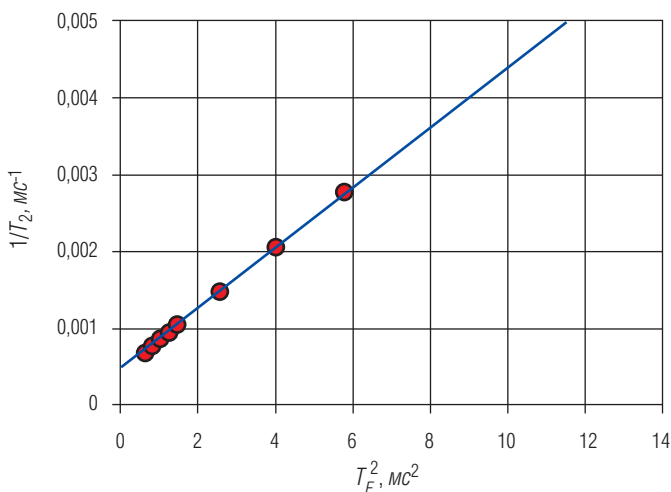


Рис. 4. Зависимость для определения градиента магнитного поля

В результате проведенных исследований установлено, что время объемной релаксации, определенное по приведенной методике, должно лежать в диапазоне от 2,1 до 2,4 с для чистой дистиллированной воды.

Для создания сильного постоянного магнитного поля в зоне исследования в аппаратуре ЯМТК применяются специально изготовленные для этой цели редкоземельные постоянные магниты. Несмотря на высокое качество изготовления магнитов для скважинной аппаратуры, они не являются абсолютно идентичными. На этапе изготовления прибора проводятся детальные исследования каждого магнита для оценки магнитного поля, создаваемого прибором. Для этого проводятся измерения индукции магнитного поля с использованием высокочувствительной аппаратуры. Измеренные характеристики магнита фиксируются для дальнейшего контроля, а по полученным данным рассчитывают значение градиента магнитного поля в зоне исследования (рис. 5).

Рассчитанное по зависимости (1) значение градиента сравнивается с паспортным значением для данного прибора. При проведении такого сравнения необходимо учитывать, что при интенсивной эксплуатации прибора в условиях высоких температур и давлений

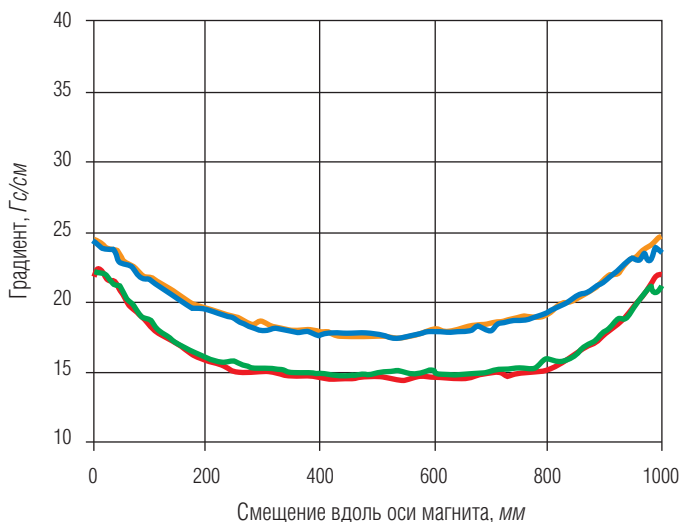


Рис. 5. Измерение градиента магнитного поля

может проявиться «эффект старения» магнита и градиент магнитного поля в зоне исследования может измениться. Поэтому анализ этих данных необходимо проводить с учетом «возраста» прибора, условий его эксплуатации и данных предыдущих калибровок.

Если в процессе проведения калибровки установлено, что описанная зависимость имеет линейный характер (рис. 4), регистрируемое время поперечной релаксации T_2 лежит в указанном диапазоне, а изменения градиента магнитного поля в зоне исследования не носят критического характера, аппаратура признается прошедшей калибровку и пригодной к дальнейшей эксплуатации.

Программное обеспечение, используемое для калибровки скважинной аппаратуры, способно проводить описанную серию измерений в автоматическом режиме без вмешательства оператора.

Дополнительные исследования и тестирование

При рассмотрении вопросов проведения периодической калибровки скважинной аппаратуры по пористости было сказано о линейности ее градуировочной характеристики. Этот факт устанавливается с помощью дополнительных исследований, которые проводятся с исполь-

зованием специальной эталонной емкости (резервуара), состоящей из нескольких секций, последовательно заполняемых водой (рис. 6).

При заполнении водой каждой последующей секции резервуара производится измерение общей пористости, в результате чего получают градуировочную характеристику прибора (рис. 7).

Установлено, что в силу особенностей конструкции для всех типов аппаратуры ЯМТК градуировочная характеристика может быть признана линейной на протяжении всего срока эксплуатации. По этой причине подобный вид исследований не проводится при периодической калибровке аппаратуры.

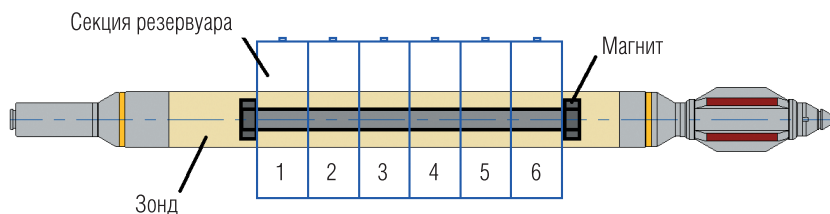


Рис. 6. Эталонная емкость из шести секций

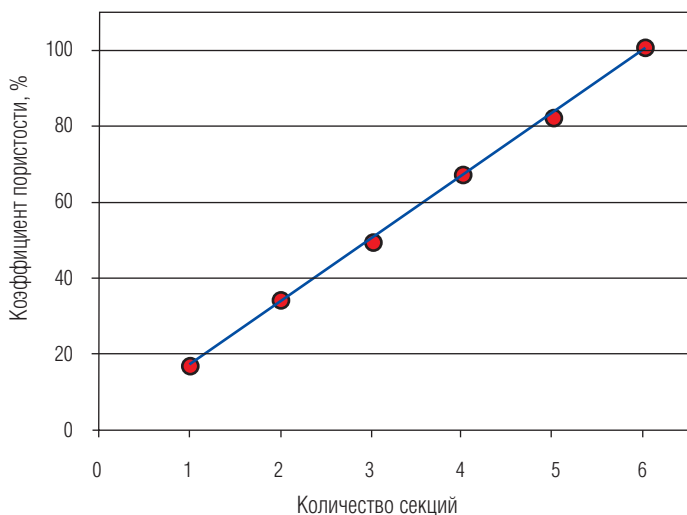


Рис. 7. Градуировочная характеристика прибора ЯМТК

Исследование работы приборов ЯМК при высоких температурах также не относится к обязательным мероприятиям, проводимым при периодической калибровке. Такие исследования проводятся только при вводе новых приборов в эксплуатацию, а также после проведения серьезных ремонтов и модификаций. Целью прогрева является проверка работоспособности прибора во всем диапазоне рабочих температур, а также контроль стабильности его метрологических характеристик.

Измерения проводятся с использованием стандартной импульсной последовательности КПМГ, применяемой при каротаже для определения фильтрационно-емкостных свойств. В процессе прогрева контролируются основные параметры аппаратуры: амплитуды радиоимпульсов, напряжения и токи в различных узлах прибора. Основными величинами, характеризующими стабильность метрологических характеристик аппаратуры, являются полученные в результате обработки зарегистрированных данных значения пористости и времени релаксации T_2 .

При проведении исследований и последующем анализе полученных данных необходимо учитывать влияние помех промышленного происхождения, которые могут существенно искажать сигнал ЯМР даже при качественном экранировании и заземлении.

Выводы

Разработанный комплекс метрологических средств и мероприятий позволяет обеспечить нормированные показатели точности производимой и используемой в ООО «Нефтегазгеофизика» аппаратуры ЯМТК в искусственном магнитном поле в течение всего срока ее службы при соблюдении условий эксплуатации и своевременного проведения необходимого сервисного обслуживания. Это подтверждается, в том числе, большим объемом проводимых работ, качество которых высоко оценивается заказчиками, а точность впоследствии подтверждается в процессе проведения дальнейших геофизических исследований и эксплуатации скважин.

Проведение исследований приборов при высоких температурах позволяет повысить их надежность и отказоустойчивость и подтвердить стабильность их метрологических характеристик во всем диапазоне рабочих температур.

Периодическая калибровка аппаратуры в настоящий момент является неотъемлемой частью технологии ЯМТК. Периодичность ее проведения регламентируется стандартом организации [4] и в соответствии с технической инструкцией [9] составляет три месяца. По результатам проведения работ оформляется протокол, подтверждающий работоспособность прибора и свидетельствующий о его пригодности к дальнейшей эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. 1716410А1 СССР, МКИ5 G01N 24/08. Вещество для ЯМР-исследований водородсодержащих образцов горных пород / Чижик В. И., Белорай Я. Л., Михайлов В. И., Неретин В. Д., Чернышев Ю. С. № 4747062/25; Оpubл. 29.02.92. Бюл. № 8.
2. Аксельрод С. М. Ядерно-магнитный каротаж в искусственном магнитном поле (по материалам американских геофизических журналов) // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 1998. Вып. 49. С. 46–63.
3. Аксельрод С. М., Неретин В. Д. Ядерный магнитный резонанс в нефтегазовой геологии и геофизике. М.: Недра, 1990. 192 с.
4. Аппаратура ядерно-магнитного каротажа ЯМТК. Методика калибровки. СТО ГИЦН 009-2015. Тверь, 2015.
5. Барляев В. Ю., Барташевич В. В., Громцев В. К., Зеленов А. С. и др. Расширение возможностей производственного применения российской технологии ядерно-магнитного каротажа в искусственном поле // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2006. Вып. 2–4 (143–145). С. 97–108.
6. Зеленов А. С., Иванов Ю. Л. Исследование влияния градиента магнитного поля на результаты измерений методом ядерно-магнитного резонанса // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2015. Вып. 254. С. 42–52.
7. Патент № 2181901 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Хаматдинов Р. Т.; АОЗТ НПФ «Каротаж» (RU) № 2001101813/28. Заявл. 19.01.2001. Оpubл. 27.04.2002. Бюл. № 13.
8. Патент № 2367982 РФ. Способ каротажа с использованием ядерно-магнитного резонанса и устройство для его осуществления / Митюшин Е. М., Сошин С. С., Хаматдинов Р. Т.; ООО «Нефтегазгеофизика» (RU) № 2008131376/28. Заявл. 31.07.2008. Оpubл. 20.09.2009. Бюл. № 25.
9. Техническая инструкция по проведению геофизических исследований и работ приборами на кабеле в нефтяных и газовых скважинах (РД 153-39.0-072-01). М.: Издательство «ГЕРС», 2001.
10. Хаматдинов Р. Т., Митюшин Е. М., Барляев В. Ю., Мурцовкин В. А. Ядерно-магнитный томографический каротаж // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 100. С. 138–171.

11. Широков В. Н., Лобанков В. М. Метрология, стандартизация, сертификация: Учебник. М.: МАКС Пресс, 2008. 498 с.
12. Coats G. R., Vinegar H. J., Tutunjian P. N., Gardner J. S. Restrictive Diffusion from Uniform Gradient NMR Well Logging. SPE 26472. The 68th Annual Technical Conference and Exhibition of the SPE. 1993.
13. Dunn K. J., Bergman D.J., LaTorraca G.A. Nuclear Magnetic Resonance. Petrophysical and Logging Applications. NY.: Pergamon, 2002. P. 94.
14. George R. Coates, Lizhi Xiao, Manfred G. Prammer. NMR Logging Principles and Applications. Houston: Halliburton Energy Services, 1999.

Рецензент канд. техн. наук А. В. Шумилов

УДК 531.746,550.8.08,550.832

И. В. Гринев, А. Б. Королев, В. Н. Ситников
ООО «Нефтегазгеофизика»

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИНКЛИНОМЕТРОВ

Рассмотрены и классифицированы погрешности, встречающиеся при измерениях магнитометрическими инклинометрами. Предложены два подхода к классификации погрешностей: по характеру проявления и по источнику их происхождения.

Ключевые слова: инклинометр, погрешности, классификация.

Введение

Классификации погрешностей геофизических исследований скважин (ГИС) посвящено достаточно много работ. Наиболее полно она рассмотрена в [1].

Инклинометрическим исследованиям, как одному из методов ГИС, также присущи погрешности измерений. Широкий класс этих погрешностей и их источников, диапазоны количественных погрешностей значений подробно описаны в [5, 6], там же предложена и определенная их классификация.

К сожалению, до настоящего времени нет работ, в которых рассматривается весь или почти весь перечень погрешностей, как нет и работ, в которых приводится подробная классификация погрешностей инклинометрических исследований. Большинство имеющихся работ, в которых уделяется внимание классификации погрешностей, ограничиваются лишь грубым вариантом классификации по причине возникновения и характеру проявления.

Настоящая статья ставит своей целью привести более подробную, насколько это возможно в рамках одной статьи, классификацию погрешностей инклинометрических исследований, свойственных магнитометрическим инклинометрам (оснащенным также акселерометрическими датчиками).

В процессе эксплуатации на инклинометр и инклинометрический датчик воздействует целый ряд случайных и закономерных факторов, приводящих к дополнительным погрешностям измерений, сравни-

мым, а иногда и превосходящим по абсолютной величине основную погрешность.

В качестве неполного перечня можно выделить следующие факторы, приводящие к дополнительным погрешностям (приведенный перечень не претендует на полноту):

- температура окружающей среды;
- ускорения (линейные и центростремительные) в движении инклинометра, влияющие на показания акселерометрических датчиков. К данному перечню также относятся ударные воздействия, вибрации, а также вращение инклинометра вокруг своей оси;
- искажения магнитного поля Земли из-за воздействия кондуктора, бурильных труб и иных ферромагнитных материалов в непосредственной близости к инклинометрическому датчику;
- вариации и локальные аномалии магнитного поля Земли, которые выражены в регулярных и нерегулярных колебаниях его компонент [2–4];
- другие факторы (изгиб охранный кожуха, нестабильность питающего напряжения, ошибки программного обеспечения и др.).

В настоящей статье предлагаются два варианта классификации погрешностей инклинометрии: по источнику их возникновения и по характеру их проявления.

В [5, 6] предложена ограниченная классификация погрешностей по причине (источнику) возникновения:

- *методические погрешности* (например, возникающие при расчете координат оси скважины [7]);
- *технологические погрешности* (например, вызванные несоосностью скважинного прибора инклинометра и ствола скважины);
- *инструментальные погрешности*, присущие применяемым инклинометрам (иногда эти погрешности называют аппаратными).

Авторы статьи считают необходимым дополнить приведенную выше классификацию еще одним видом погрешностей – *субъективными погрешностями*, называемыми также ошибками оператора. Объективности ради, следует заметить, что этот класс погрешностей благодаря компьютеризации измерительного процесса играет чрезвычайно малую роль.

Наглядно приведенная классификация погрешностей по источнику возникновения приведена на рис. 1.

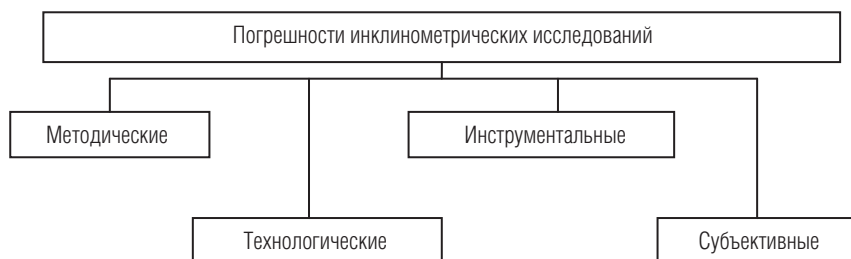


Рис. 1. Классификация погрешностей инклинометрических исследований по источнику возникновения

По характеру проявления погрешности можно классифицировать следующим образом:

- *грубые погрешности* (промахи), например, из-за ударных воздействий на инклинометр;
- *случайные погрешности*, вызванные, например, шумами первичных преобразователей;
- *систематические погрешности*, которые в зависимости от характера изменения во времени можно разделить на постоянные (неизменяющиеся во времени, например, погрешности калибровки, несоосность первичных преобразователей и скважинного прибора, их неортогональность и др.); переменные (изменяющиеся во времени), среди которых выделяют прогрессирующие (дрейфовые), периодические и изменяющиеся по сложному закону (нерегулярные) погрешности.

Такой подход к классификации погрешностей проиллюстрирован на рис. 2.

Детальные описания конкретных источников и характера проявления погрешностей инклинометрических исследований приведены в многочисленных работах, в том числе в [2–7], поэтому в настоящей работе не рассматриваются.

Приведенная в настоящей статье классификация погрешностей, по мнению авторов, позволяет выработать общие подходы к минимизации большей части погрешностей: промахи исключаются из данных (при использовании корректных критериев обнаружения погрешностей данного типа), случайные погрешности устраняются фильтрацией данных, периодические и изменяющиеся по сложному закону погрешности – путем внесения соответствующих поправок и т. д.

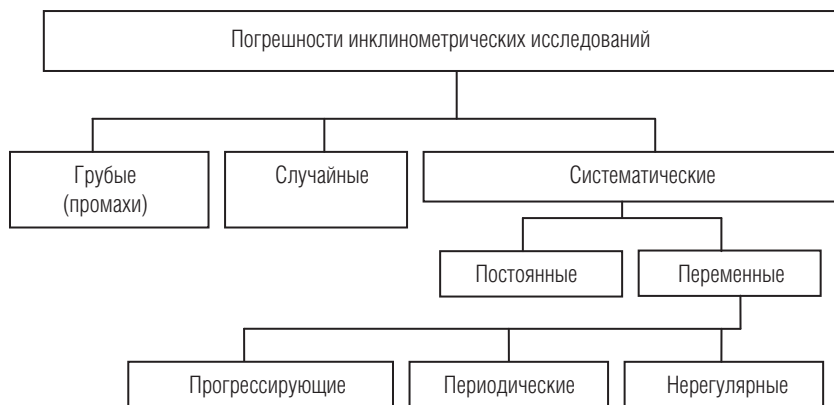


Рис. 2. Классификация погрешностей инклинометрических исследований по характеру проявления

ЛИТЕРАТУРА

1. Абросимов М. Г., Блюменцев А. М., Козыряцкий Н. Г., Мельчук Б. Ю. Метрологическое обеспечение геофизических исследований скважин: Справочник. М.: ГНЦ РФ ВНИИгеосистем, 2011. 134 с.
2. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н., Тихомиров А. Н. Мониторинг вариаций геомагнитного поля с целью комплексного уточнения инклинометрических измерений // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 9 (267). С. 172–185.
3. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Повышение точности инклинометрических измерений в субвертикальных скважинах // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2016. Вып. 12 (270). С. 98–113.
4. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Гибридный метод градуировки инклинометрических датчиков // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2018. Вып. 9 (291). С. 62–73.
5. Козыряцкий Н. Г. Принципы метрологического обеспечения инклинометрии нефтяных и газовых скважин: Дис. ... канд. технич. наук. Тверь: ВНИГИК, 1987. 216 с.
6. Козыряцкий Н. Г. Источники погрешностей инклинометрических исследований скважин // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2013. Вып. 3 (225). С. 215–234.
7. Козыряцкий Н. Г. Анализ точности расчета координат ствола скважины по данным инклинометрии // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2002. Вып. 98. С. 115–122.

Рецензент доктор техн. наук, проф. Г. В. Миловзоров