

УДК 531.746,550.832

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

КОМПЕНСАЦИЯ ВЛИЯНИЯ ПОЛЯ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ И СБОРКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ПОКАЗАНИЯ ИНКЛИНОМЕТРА

Рассмотрены два варианта метода, один из которых позволяет производить компенсацию магнитных помех непосредственно во время измерений, а другой – после бурения или каротажа. Показано, что приведенные методы позволяют рассчитать значение магнитных помех и скомпенсировать их влияние.

Ключевые слова: скважина, инклинометр, бурильная колонна, намагниченность, точность, азимут.

Введение

Магнитометрические датчики инклинометра, в случае реальных измерений автономной аппаратурой или во время бурения, измеряют не собственно геомагнитное поле Земли (ГМП), а суперпозицию ГМП и полей остаточной намагниченности (ПОН) бурильной колонны и геофизических приборов. При использовании кабельной аппаратуры измеряется суперпозиция ГМП и ПОН сборки геофизических приборов.

При измерениях в процессе бурения вопрос минимизации влияния ПОН решается использованием немагнитных вставок необходимой длины [7]. В случае использования автономной каротажной аппаратуры вопрос уменьшения влияния ПОН зачастую решается только правильной компоновкой сборки (использование инклинометра в качестве концевой прибора с располагающимся выше слабомагнитным прибором). Существенно реже используются немагнитные вставки, однако, как правило, их длины бывает недостаточно. Аналогичная ситуация наблюдается и в случае кабельных сборок. Стоит отметить, что проблема усугубляется еще и тем, что компоновка приборов с целью минимизации магнитных влияний на инклинометр, а также длина немагнитных вставок не регламентированы.

Таким образом, значение ПОН зачастую является достаточным для того, чтобы существенно исказить инклинометрические дан-

ные. Особенно это выражено в наклонно-направленных скважинах с субгоризонтальными участками, бурение в которых производится приблизительно на магнитный запад или восток. Причем данная проблема становится тем существеннее, чем больше значение угла наклона ГМП в области измерений [4].

Использование немагнитных вставок не единственный метод уменьшения влияния ПОН на инклинометрические данные. Например, в статье [1] предлагается метод размагничивания бурильного оборудования. Кроме того, существуют методы математической компенсации магнитных помех в процессе каротажа [3, 6]. Однако в литературе недостаточно рассмотрен вопрос компенсации магнитных помех после завершения каротажа на основе измеренных данных при условии, что не всегда известны модуль и наклонение ГМП в зоне замеров. В данной работе рассмотрены методы такой компенсации.

Метод компенсации поля остаточной намагниченности

Авторы уже рассматривали влияние ПОН на результаты инклинометрии [4]. В связи с этим не будем останавливаться на теоретическом аспекте, сразу перейдя к методу оценки и компенсации магнитных помех.

В работе [4] показано, что модуль ПОН (Δh) почти не меняется на всем протяжении каротажа. Помимо этого, его с высокой степенью точности можно считать коллинеарным вертикальной оси инклинометра. В то же время возможны два варианта расчета величины магнитной помехи на основе инклинометрических данных.

Первый вариант:

$$\Delta h_i^{(\psi)} = (H'_i \sin \psi'_i - H \sin \psi) / \cos \theta'_i, \quad (1)$$

где H и ψ – модуль и наклонение ГМП в месте измерений; H'_i и ψ'_i – расчетные модуль и угол наклона магнитного поля в текущей точке; θ'_i – текущий расчетный зенитный угол инклинометра; i – номер измерения.

Второй вариант:

$$\Delta h_i^{(H)} = -H\omega_i + \sqrt{H^2(\omega_i^2 - 1) - H'^2_i}, \quad (2)$$

где $\omega_i = \sin \psi \cos \theta'_i + \cos \psi \sin \theta'_i \cos \alpha'_i$; α'_i – расчетный азимут в текущей точке.

Корректировка во время каротажа. При условии известных H и ψ необходимо в начале каротажа произвести вычисление Δh по формулам (1)–(2) в нескольких точках с последующим усреднением. Стоит отметить, что эти формулы плохо работают при $\theta'_i > 85 \text{ град}$. В связи с этим предлагается определять значение поля помехи в области зенитных углов $10 \leq \theta'_i \leq 85 \text{ град}$.

В дальнейшем с использованием найденного значения возможен расчет скорректированного значения азимута [4]:

$$\alpha_i = 360 \cdot \Omega(p_i) - p_i \cdot \arccos \left\{ \frac{k_i \sqrt{H^2 \cos^2 \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha'_i) - \Delta h^2 \sin^2 \theta'_i \operatorname{tg}^2 \alpha'_i} - \Delta h \sin \theta'_i \operatorname{tg}^2 \alpha'_i}{H \cos \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha'_i)} \right\}, \quad (3)$$

где $k_i = \operatorname{sgn}(\cos \alpha'_i)$ и $p_i = -\operatorname{sgn}(\sin \alpha'_i)$ – знаки; $\Omega(p_i)$ – функция Хевисайда.

Измеренные значения H и ψ авторы предлагают записывать непосредственно в калибровочный файл после калибровки в области, близкой к той, в которой проводится каротаж.

Корректировки после каротажа. В том случае если не известны H и ψ в месте исследования, необходимо вычислить их на основе собранных данных. В качестве параметра сходимости может выступать

$$S_{\Delta h} = \sum_i (\Delta h_i^{(H)} - \Delta h_i^{(\psi)})^2, \quad (4)$$

который считается критерием близости расчетных значений по формулам (1) и (2). А также можно использовать критерии близости расчетных значений к постоянной величине:

$$S_{\psi} = \sum_i (\Delta h_i^{(\psi)} - \langle \Delta h^{(\psi)} \rangle)^2, \quad (5)$$

$$S_H = \sum_i (\Delta h_i^{(H)} - \langle \Delta h^{(H)} \rangle)^2, \quad (6)$$

где $\langle \Delta h^{(\psi)} \rangle$ и $\langle \Delta h^{(H)} \rangle$ – средние значения массивов $\Delta h_i^{(\psi)}$ и $\Delta h_i^{(H)}$, полученных на основе каротажных данных формулы (1)–(2). Напоминаем, что Δh в большинстве случаев в процессе каротажа практически не меняется [2].

Общий критерий сходимости можно записать в виде

$$S = q_1 S_{\Delta h} + q_2 S_H + q_3 S_{\psi}, \quad (7)$$

где q_1 , q_2 и q_3 – весовые коэффициенты при соответствующих критериях сходимости. Поиск H и ψ из (1)–(2) осуществляется путем минимизации общего критерия сходимости (7). В качестве начального решения для H и ψ используются значения, измеренные при наименьшей глубине.

Зависимость компонент ГМП от времени и глубины исследования. Следует заметить, что H и ψ не являются постоянными величинами ни во времени [5], ни, что более значимо в рассматриваемой задаче, по глубине исследования [2]. Это вызвано тем, что на измеряемые параметры ГМП, помимо рассматриваемых магнитных помех, влияет ряд факторов, а именно:

1. Зависимость компонент вектора ГМП от альтитуды: изменения составляют 3–5% и более на интервале глубин от поверхности до 3000 м. Эти изменения принципиально зависят от географического положения точки исследования, типа и магнитных свойств пород разреза скважины.

2. Суточные вариации ГМП.

3. Магнитные бури.

Помимо этого, на измеряемые параметры накладывается несовершенство инклинометра как измерительной системы:

1. Погрешность температурной калибровки: приблизительно до 0,5% на высоких температурах (выше 100 °C).

2. Зависимость от ориентации в пространстве (погрешность геометрической калибровки): в пределах 0,3–0,5%.

Как показывает практика, приемлемых для практического использования результатов можно добиться при использовании постоянных значений H и ψ . Однако при дальнейшем развитии метода для учета суммарного влияния приведенных факторов, а также для анализа зависимости компонент ГМП от альтитуды H и ψ должны быть представлены в виде полиномов от абсолютной глубины скважины или длины бурового инструмента.

Результаты обработки инклинометрических данных

Индикация. Как следует из теоретических зависимостей [4], модуль суперпозиции ГМП и ПОН уменьшается с ростом зенитного угла. Этот факт может быть полезен для индикации наличия влияния

ПОН. Так, в качестве индикатора наличия магнитной помехи может выступать линейный коэффициент корреляции Пирсона ($r_{\theta H}$) между измеренными значениями зенитного угла (θ_i) и модуля магнитного поля (H_i). Анализ имеющихся данных показывает, что в случае значения ПОН от 1% и выше наблюдаются достаточно большие значения коэффициента корреляции (в большинстве случаев $|r_{\theta H}| > 0,6$), достигая максимума ($|r_{\theta H}| > 0,85$) при значениях Δh от $0,03H$ до $0,06H$. По всей видимости, это связано с тем, что при $\Delta h > 0,01H$ влияние ПОН на H' начинает превалировать над влиянием на H' ориентации инклинометра в пространстве.

Высокий коэффициент корреляции между расчетными θ' и H' ($|r_{\theta H}| > 0,6$) может выступать в качестве косвенного признака наличия существенного влияния «паразитного» поля. Кроме того, следует иметь в виду, что дополнительными причинами влияния «паразитного» поля являются:

1) нахождение азимута в областях, в которых максимальна погрешность, связанная с влиянием ПОН [4];

2) небольшая длина сборки приборов (менее 40 м), то есть меньшее расстояние от буровой колонны;

3) значения текущего расчетного зенитного угла инклинометра θ' больше 15 град, наличие субгоризонтальных участков.

Обработка. Для отработки и апробации алгоритма определения величины поля помехи были проанализированы инклинометрические данные (измерения датчиками МИД-35, ИОН-2, ИМР) по 49 скважинам Западной Сибири, Русского Севера и Поволжья. Из них для 27 скважин имелись данные телесистемы, что позволяло провести сравнение измеренных азимутов. Результаты обработки части скважин приведены на рисунке, где можно видеть, что после корректировки за влияние магнитных помех разности азимутов скважинного инклинометра и телесистемы не выходят за рамки допуска. Модуль поля помехи менялся в пределах от 1,0 до 6,5% от модуля ГМП.

Однозначно можно отметить, что в коротких сборках модуль поля помехи был в среднем больше, чем в длинных, вследствие меньшего расстояния до бурового инструмента (до 6,5% от модуля ГМП при длине сборки 9,38 м). Также интересен тот факт, что, судя по расчетам, модуль ПОН не менялся по величине ни в одной из рассматриваемых скважин (отсутствие перемагничиваний), а в случае одинаковых компоновок он отличался в очень малых пределах.

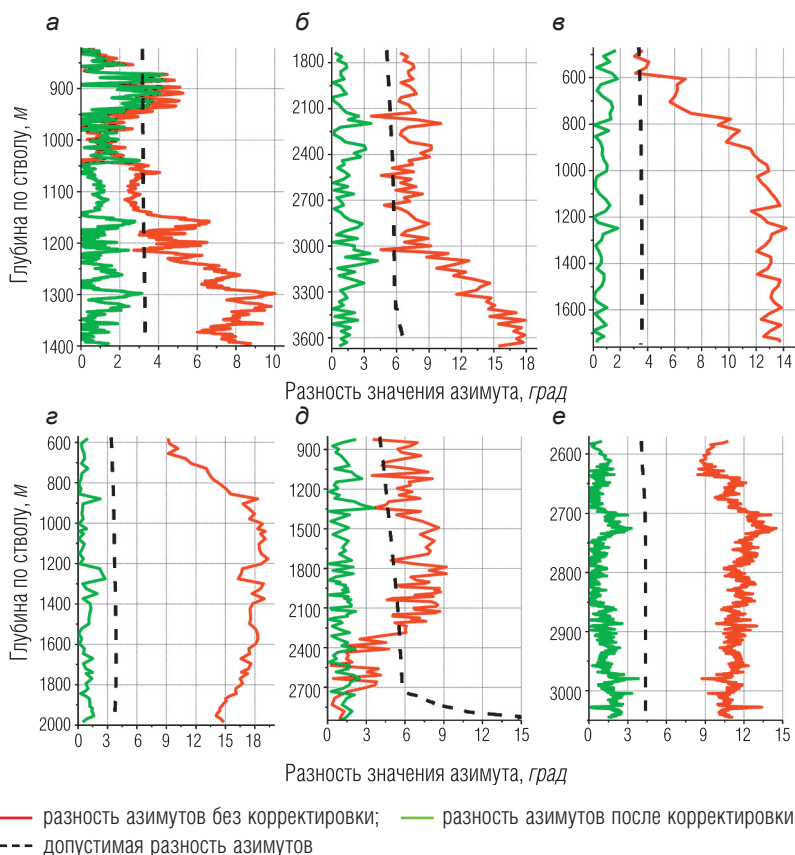


Рис. Разность азимуты инклинометра и телесистемы до и после корректировки магнитной помехи в скважинах на месторождениях: а – Метелинское; б – Яро-Яхинское; в – Наульское; г – Наульское; д – Ай-Пимское; е – Лабаганское

С использованием полученного алгоритма также были обработаны данные по 5 скважинам без сравнения с данными телесистемы. Результаты анализа в целом (по величине модуля помехи и характеру сходимости) хорошо согласуются с анализом данных с наличием телесистемы.

Помимо этого проводилась обработка данных на основе модели [4] с проведением сравнения с телесистемой без использования

алгоритма (для применения алгоритма в этих случаях не хватало первичных данных для получения расчетных значений модуля и наклона магнитного поля):

- 5 скважин, записанных датчиком МИД-35 в концевом инклинометре (расчетные значения в пределах 1,0–5,5% от модуля ГМП);
- 6 скважин с датчиком ИОН-2 в концевом инклинометре (расчетные значения находились в пределах 3,5–4,0% от модуля ГМП);
- 6 кабельных сборок с датчиками МИД-35 и ИОН-2 (расчетные значения в пределах от 5,2% от модуля ГМП в случае концевой использования до 8,0–12,5% от модуля ГМП в случае транзитного исполнения).

Обработка во всех этих случаях также продемонстрировала адекватность используемой теоретической модели.

Заключение

Как показывает практика, поведение ошибки расчета азимута инклинометра, связанной с влиянием ПОН, хорошо согласуется с теоретической моделью. Предложенный алгоритм расчета величины модуля ПОН и корректировки значений азимута инклинометра показал высокую эффективность на большом объеме материала реальных инклинометрических измерений. Таким образом, предложенный метод корректировки может использоваться как непосредственно во время измерений датчиками телесистемы или скважинного инклинометра, так и для обработки измеренных данных.

Значение модуля ПОН в рассматриваемых скважинах находилось в пределах от 1 до 6,7% от модуля ГМП в автономных сборках; от 5,2 до 12,5% от модуля ГМП в кабельных сборках. Наблюдались также следующие зависимости:

- в сборках короче 45 м при уменьшении их длины, как правило, возрастает значение ПОН;
- в кабельных сборках в случае не концевой, а транзитной эксплуатации инклинометра влияние ПОН было сильнее.

Дальнейшее развитие метода связано с представлением модуля и наклона вектора ГМП не в виде постоянных величин, а в виде функции глубины. Это, помимо повышения точности метода, позволит также проанализировать зависимость компонент ГМП от глубины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бармаков Ю. Н., Герасимчук О. А., Козырев П. В. и др. Исследование и разработка методов для устранения намагниченности оборудования буровой установки // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2019. № 1 (295). С. 98–104.
2. Белоглазова Н. А. Программно-методический комплекс для магнитометрических исследований сверхглубоких и разведочных скважин: Дис... канд. техн. наук. Екатеринбург: Институт геофизики УрО РАН, 2006. 134 с.
3. Биндер Я. И., Ключкин П. А., Тихонов А. Г. Экспериментальное исследование магнитометрической системы ориентации ствола скважины с компенсацией магнитных помех // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2010. № 1 (190). С. 61–67.
4. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н. Влияние остаточной намагниченности буровой колонны и сборки геофизических приборов на показания инклинометра // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2019. № 4 (298). С. 87–95.
5. 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. № 9 (267). С. 172–185.
6. Рыжков И. В., Ковшов Г. Н. Расчет магнитной девиации инклинометра в условиях буровой // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. 2011. № 11-12 (164-165). С. 86–91.
7. Introduction to Wellbore Positioning. University of the Highlands & Islands. 2012. 164 p.

Рецензент доктор техн. наук, проф. А. А. Молчанов