

5. Индрupский И. М., Блинова Е. Ю., Коваленко К. В. Влияние неоднородности вещественного состава цемента на петрофизические и фильтрационные характеристики коллектора // Нефтяное хозяйство. 2013. № 7. С. 76–80.
6. Коваленко К. В., Кожевников Д. А., Мартынов В. Г. Использование петрофизической модели эффективной пористости в геомоделировании // Тр. РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина. 2012. № 2 (267). С. 24–28.
7. Кожевников Д. А., Коваленко К. В. Изучение коллекторов нефти и газа по результатам адаптивной интерпретации геофизических исследований скважин. М.: РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина, 2011. 219 с.

Рецензент доктор геол.-минер. наук, проф. Ю. И. Кузнецов

УДК 531.746,550.832

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

ВЛИЯНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ И СБОРКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА ПОКАЗАНИЯ ИНКЛИНОМЕТРА

Показано, что остаточная намагниченность бурильной колонны и сборки геофизических приборов, располагающихся недалеко от инклинометрического датчика, отрицательно влияет на точность измерений магнитного азимута. Выявлены зоны пространственной ориентации инклинометра, для которых характерна наибольшая погрешность, вызванная данной причиной. Построена теоретическая модель суперпозиции геомагнитного поля и поля остаточной намагниченности, приведены теоретические зависимости. Даны рекомендации по оценке величины рассматриваемого влияния и корректировке расчетных значений азимута.

Ключевые слова: инклинометр, остаточная намагниченность, магнитная индукция, повышение точности показаний азимута.

Введение

Известно, что значительная часть геофизических приборов, а также бурильная колонна имеют собственное поле остаточной намагниченности (ПОН), вектор которого обычно направлен приблизительно по оси сборки геофизических приборов (рис. 1). Это дополнительное поле влияет на показания инклинометрических датчиков [1–6, 8].

Несложно понять, что в случае использования автономной аппаратуры наблюдается суперпозиция полей сборки приборов и колонны, а в случае использования кабельных приборов на показания инклинометра влияет только поле сборки приборов, причем влияние зачастую более выражено в том случае, если инклинометр используется в качестве промежуточного, а не концевого прибора.

Компенсация такого влияния обычно решается использованием дорогостоящих немагнитных вставок, которые увеличивают расстояние между измерительным датчиком, намагниченными приборами и колонной, уменьшая тем самым их влияние. В зарубежной литературе можно найти конкретные рекомендации [7] по величине таких немагнитных вставок в зависимости от широты местности и диапазонов рабочих углов скважины. Однако отечественные службы, проводящие бурение и каротаж, не имеют общепринятых стандартов по величине немагнитных вставок. В связи с этим в ряде случаев наблюдаются сложно интерпретируемые расхождения между значениями измерений азимута телеметрической аппаратурой и скважинными инклинометрами. Эти расхождения чаще всего наблюдаются в зонах, где ось инклинометра направлена примерно к магнитному западу или востоку (причины такой зональной выраженности будут рассмотрены ниже). Таким образом, вопрос теоретического описания и учета влияния ПОН стоит достаточно остро.

Теоретическая модель влияния ПОН

Оценим влияние ПОН (рис. 1) на расчетные значения азимута, модуля и угла наклонения измеряемого магнитного поля.

Если ввести модуль индукции ПОН (Δh), то можно записать систему уравнений для суммарных нормированных компонент (x, y, z) магнитного поля на оси неподвижной системы координат:

$$\begin{cases} x = H \sin \psi + \Delta h \cos \theta, \\ y = -\Delta h \sin \theta \sin \alpha, \\ z = H \cos \psi + \Delta h \sin \theta \cos \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где H – нормированный на единицу модуль геомагнитного поля (ГМП); ψ – угол наклонения ГМП в месте проведения инклинометрических измерений; θ и α – зенитный угол и азимут (истинный) инклинометра соответственно.

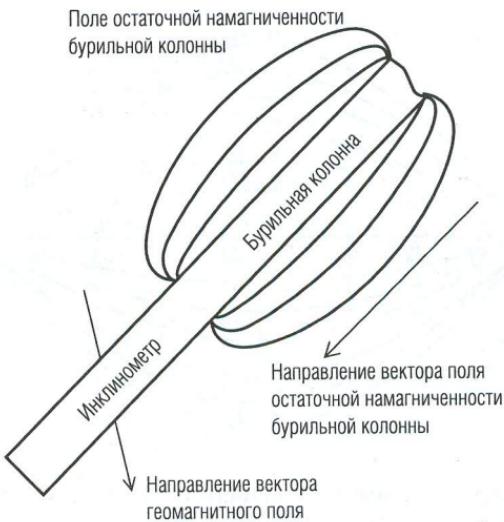


Рис. 1. Поле остаточной намагниченности (ПОН) бурильной колонны и/или сборки геофизических приборов. Вектор магнитной индукции ПОН является коллинеарным к орту оси системы координат магнитометров (направлен по оси инклинометра)

Зависимости от визирного угла (ϕ) нет вследствие того, что вектор $\Delta\vec{h}$ является коллинеарным к орту оси Z системы координат магнитометров (направлен по оси инклинометра). Зная компоненты (1), можно рассчитать ошибку определения азимута

$$\Delta\alpha = \operatorname{arctg} (y/z), \quad (2)$$

а также измененные значения модуля

$$\tilde{H} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3)$$

и угла наклонения

$$\tilde{\psi} = \operatorname{arcsin} (x/\tilde{H}) \quad (4)$$

суперпозиционного магнитного поля.

Если взять модуль добавочного поля Δh равным $0,03H$ (по данным авторов, Δh меняется в пределах $0,01H - 0,12H$, наиболее часто в пределах $0,01H - 0,05H$), то можно построить графики приведенных выше величин в зависимости от азимута и зенитных углов (рис. 2–4).

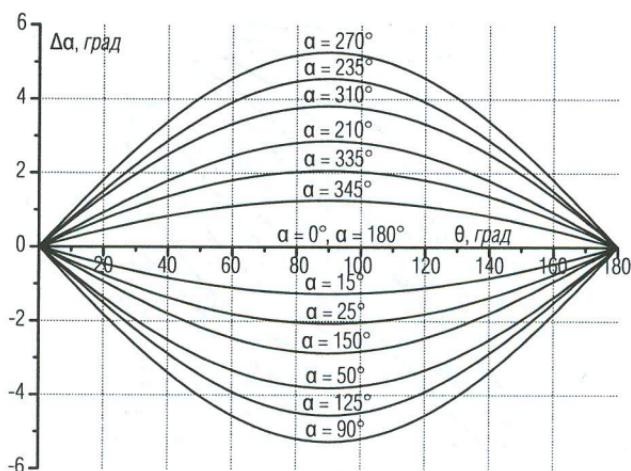


Рис. 2. Ошибка расчета азимута в зависимости от зенитного угла и азимута инклинометра; $\Delta h = 0,03H$; $\psi = 71^\circ$

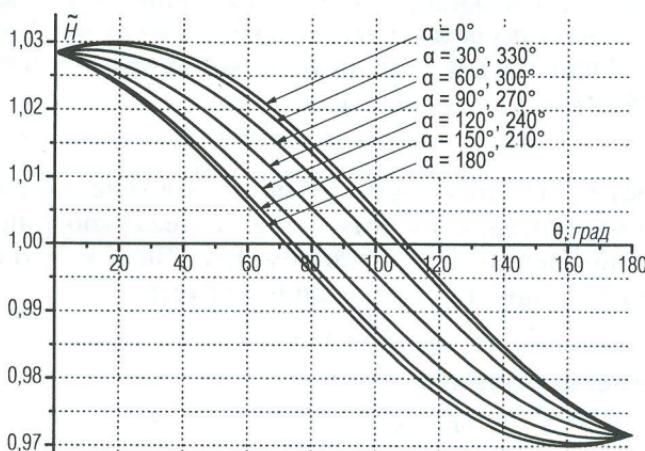


Рис. 3. Расчетный модуль вектора суперпозиции ГМП и ПОН в зависимости от зенитного угла и азимута инклинометра; $\Delta h = 0,03H$; $\psi = 71^\circ$

Расчетная величина суперпозиционного модуля вектора претерпевает серьезные изменения (рис. 3), достигая наибольшей ошибки в точках, где векторы ГМП и ПОН коллинеарны. Угол наклонения (рис. 4), напротив, наибольшего изменения достигает в плоскости мерида на при перпендикулярном положении векторов ГМП и ПОН.

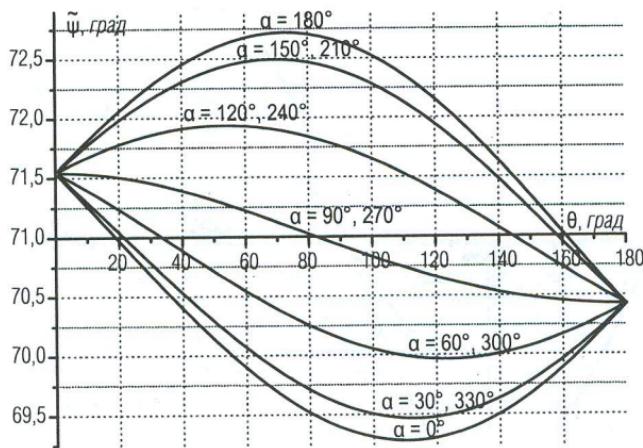


Рис. 4. Расчетный угол наклонения вектора суперпозиции ГМП и ПОН в зависимости от зенитного угла и азимута инклинометра; $\Delta h = 0,03H$; $\psi = 71^\circ$

Несложно заметить (рис. 2), что при $\Delta h = 0,03H$ (приблизительно 1500 nT для района г. Твери) наибольшая ошибка определения азимута, связанная с ПОН, достигает величины 5,3 град при направлении, перпендикулярном магнитному меридиану. Широко известно, что наибольшее влияние ПОН наблюдается при бурении скважин, направленных на магнитные запад и восток. Однако, строго говоря, это не так. Азимутальные углы, на которых наблюдается наибольшая ошибка измерения азимута, могут быть вычислены с помощью поиска экстремумов зависимости (2):

$$\alpha_n^{(\text{extr})} = 180 + (-1)^{n+1} \arccos \left(\frac{\Delta h \sin \theta}{H \cos \psi} \right), \quad (5)$$

где индекс $n = 0, 1$ определяет «западный» и «восточный» экстремумы.

Таким образом, направление, в котором будет наблюдаться наибольшая ошибка азимута, существенно зависит как от соотношения модулей индукции ПОН и ГМП (рис. 5), так и от угла наклонения ГМП (рис. 6) в месте проведения измерений. Кроме того, стоит отметить, что от угла наклонения так же сильно зависит и сама величина максимальной ошибки азимута (рис. 7). Диапазон наклонений на рис. 5–7 составляет от 60 град (Прикаспийская НГП) до 87,5 град (Северо-Карская ПНГО).

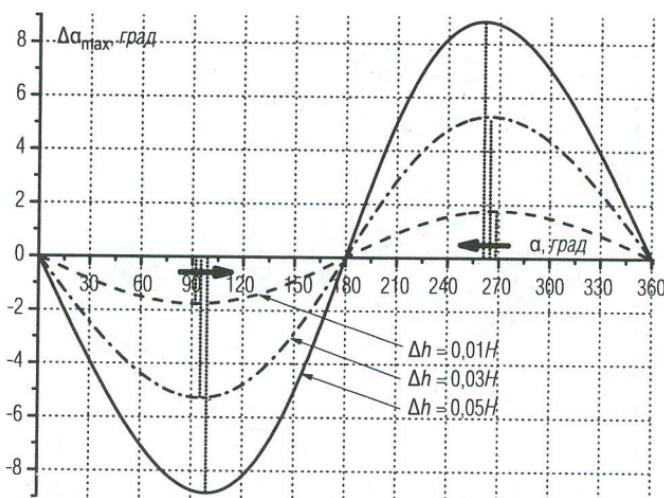


Рис. 5. Зависимость максимальной дополнительной погрешности азимута от истинного азимута инклинометра и модуля индукции ПОН. Стрелками указаны смещения экстремумов при увеличении модуля ПОН; $\psi = 71^\circ$

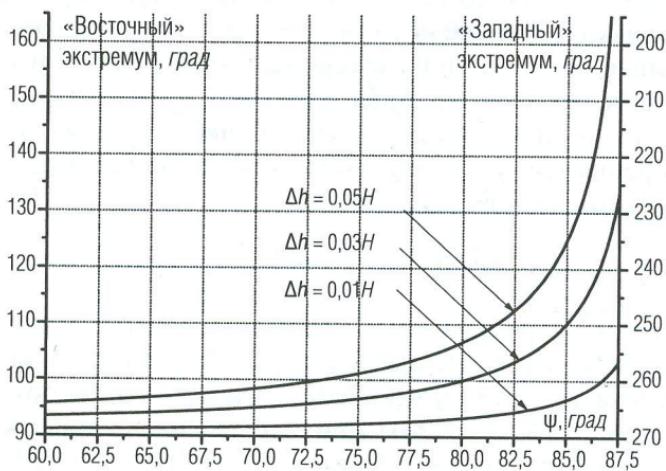


Рис. 6. Зависимость истинного азимута бурения, при котором наблюдается максимальная ошибка, связанная с ПОН, от модуля индукции ПОН и наклона ГМП

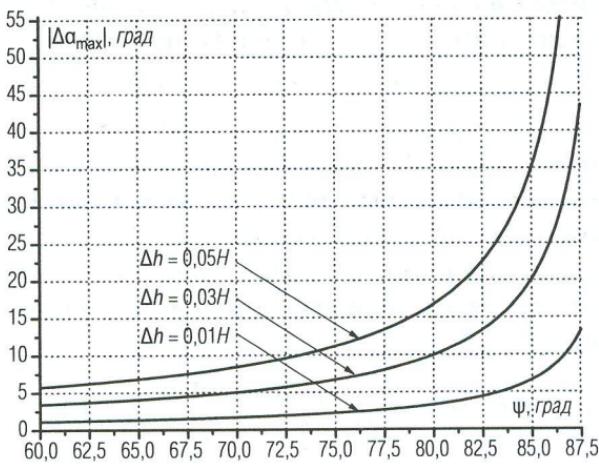


Рис. 7. Зависимость максимальной дополнительной погрешности азимута от модуля индукции ПОН и угла наклонения ГМП

Учет изменения длины колонны. Для расчета изменения параметров индукции ПОН колонна была представлена в виде суммы кольцевых витков с током с эквивалентной частям колонны магнитной индукцией. Далее, на основе закона Био–Савара–Лапласа производилось суммирование векторов индукции кольцевых витков всей колонны в точке расположения магнитометров.

Как показали расчеты, величина и направление ПОН определяются ближайшими 10–15 метрами сборки приборов и (или) колонны. То есть модуль ПОН меняется очень слабо на всем протяжении каротажа. Так, для бурильной трубы длиной от 20 до 4000 м модуль ПОН меняется всего на 2–2,5%. Причем наибольшее изменение приходится на первые 200 м колонны. Таким образом, модуль ПОН можно считать величиной постоянной на всем протяжении каротажа.

Учет искривления инструмента (форм-фактор). Как показали расчеты по вышеупомянутому методу, θ и α вектора ПОН изменяются только на участках очень интенсивного набора кривизны скважины. Причем даже эти «изгибы» редко превышают 10° . Таким образом, можно с высокой степенью точности считать, что вектор ПОН направлен по оси инклинометра.

Расчет модуля индукции ПОН. На основе формул (1) и (4) возможна оценка величины магнитной индукции ПОН по формуле

$$\Delta h = (H' \sin \psi' - H \sin \psi) / \cos \theta, \quad (6)$$

где H и ψ – модуль и угол наклонения ГМП, измеренные на калибровочном столе; H' и ψ' – расчетные модуль и угол наклонения магнитного поля; θ – расчетный зенитный угол инклинометра. H и H' используются в нормированном виде.

Корректировка значений азимута. Зная величину индукции ПОН, можно рассчитать величину вносимой погрешности, используя формулы (1) и (2):

$$\Delta \alpha = -\operatorname{arctg} \left(\frac{\Delta h \sin \theta \sin \alpha}{H \cos \psi + \Delta h \sin \theta \cos \alpha} \right), \quad (7)$$

где α' – расчетное значение азимутального угла. Исправленное значение азимута α можно вычислить по формуле

$$\alpha = \alpha' - \Delta \alpha. \quad (8)$$

Проблема использования формулы (7) для вычисления поправки азимута заключается в том, что в саму формулу входит истинное значение азимута, которое неизвестно. Однако, как показывает практика, хороший результат дает использование формулы (7) в итерационном процессе, когда в качестве значения азимута используется сначала измеренное, а потом поправленные значения азимута. За 3–5 итераций такой процесс приводит к определению исправленного значения азимута с высокой точностью.

Другой подход – использование точной формулы истинного азимута, полученной на основе формул (1), (2) и (8):

$$\alpha_i = 360 \cdot \Omega(p) - \\ - p \cdot \arccos \left\{ \frac{q \sqrt{H^2 \cos^2 \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha') - \Delta h^2 \sin^2 \theta \operatorname{tg}^2 \alpha'} - \Delta h \sin \theta \operatorname{tg}^2 \alpha'}{H \cos \psi (1 + \operatorname{tg}^2 \alpha')} \right\}, \quad (9)$$

где $q = \operatorname{sgn}(\cos \alpha')$ и $p = -\operatorname{sgn}(\sin \alpha')$ – знаки, а $\Omega(p)$ – функция Хевисайда.

Заключение

Из вышеизложенного следует, что погрешность, вызванная ПОН, зависит не только от величины индукции такого поля, но и от угла

наклонения ГМП в зоне измерений. Расчеты показали, что модуль индукции ПОН остается практически постоянным на всем протяжении измерений. Кроме того, можно пренебречь искривлением колонны и сборки приборов во время измерений вследствие малого влияния этого фактора на величину и направление вектора индукции ПОН.

Большинство месторождений нефти и газа на территории Российской Федерации располагается в зонах, в которых рекомендуемая длина немагнитных вставок между колонной и инклинометрическим датчиком должна составлять 15–30 м [7]. Естественно, что в случае проведения геофизических исследований такие требования представляются трудновыполнимыми. Однако, как показывают расчеты авторов, значения азимута в проблемных зонах можно существенно скорректировать. Для этого требуются дополнительные измерения (модуля и угла наклонения ГМП) в непосредственной близости с местом проведения каротажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биндер Я. И., Вольфсон Г. Б., Гаспаров П. М. и др. Компенсация магнитных помех в феррозондовом инклинометре // Гирроскопия и навигация. 2005. № 1 (48). С. 68–75.
2. Ковшов Г. Н., Рыжков И. В., Садовникова А. В., Пономарева Е. А. Математическая модель феррозондового инклинометрического преобразователя с учетом магнитной погрешности от колонны буровых труб // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2008. № 1–2. С. 35–39.
3. Ковшов Г. Н., Рыжков И. В., Ужеловский А. В. К вопросу определения влияния постоянной магнитной помехи на показания магниточувствительных датчиков в процессе разведочного бурения скважин на нефть и газ // Збірник наукових праць. 2013. С. –11.
4. Рыжков И. В. Определение магнитного азимута наклонной скважины при наличии внешних магнитных помех // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2009. № 12. С. –15.
5. Рыжков И. В. Ковшов Г. Н. Расчет магнитной девиации инклинометра в условиях буровой // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2011. С. 86–91.
6. Рыжков И. В., Пономарева Е. А. Моделирование вычисления азимута наклонной скважины в условиях воздействия магнитных помех // Международный научный журнал. 2014. Т. 11. С. 34–39.
7. Introduction to Wellbore Positioning. University of the Highlands & Islands. 2012. 164 p.
8. Priest J., Quinn T., Frost E. Jr., Hughes B. Magnetic Interference Effects on Accelerometer and Magnetometer Data: Detection, Quality Control and Correction // SPWLA 55th Annual Logging Symposium, May 18–22, 2014.

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