

УДК 550.832

Н. Г. Козыряцкий
ООО «Нефтегазгеофизика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ОТКРЫТОЙ ПОРИСТОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД МЕТОДОМ ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ВЗВЕШИВАНИЯ

Проведен анализ и выполнена количественная оценка методических погрешностей лабораторных определений коэффициента открытой пористости образцов горных пород (керна, шлама) методом гидростатического взвешивания (методом жидкостенасыщения), даны рекомендации по уменьшению погрешностей.

Ключевые слова: горные породы, образцы, открытая пористость, гидростатическое взвешивание, методические погрешности.

При определении коэффициента открытой пористости образцов горных пород методом гидростатического взвешивания (иначе – методом жидкостенасыщения) по методу профессора Преображенского, регламентированным в [2, 5], необходимо учитывать три основных вида погрешностей:

- методические погрешности, обусловленные особенностями данного метода;
- погрешность косвенных измерений, обусловленная погрешностями прямых измерений массы сухого образца горной породы M_1 , массы насыщенного жидкостью образца M_3 и массы образца M_2 , полученной при гидростатическом взвешивании, а также функциональной связью коэффициента открытой пористости с указанными массами;
- случайные погрешности, вызываемые либо неизвестными, либо известными, но не поддающимися количественному контролю факторами; этот вид погрешностей проявляется и может быть учтен лишь при многократных измерениях.

В данной статье будет рассмотрена первая группа погрешностей, более конкретно – те из них, которые в определенной степени поддаются количественному учету.

Методика определения коэффициента открытой пористости предусматривает выполнение следующих операций (подробность перечисления операций продиктована тем обстоятельством, что

каждая из операций может быть источником своей методической погрешности):

- 1) сушка исследуемых образцов горных пород;
- 2) взвешивание высушенных образцов;
- 3) насыщение сухих образцов жидкостью, в свою очередь предусматривающее выполнение следующих процедур:
 - а) раздельное вакуумирование исследуемых образцов и насыщающей жидкости;
 - б) насыщение вакуумированных образцов вакуумированной жидкостью;
 - в) выдержка под вакуумом образцов, погруженных в жидкость;
 - г) выдержка погруженных в жидкость образцов при атмосферном давлении;
- 4) взвешивание насыщенных образцов в воздухе, включающее в себя следующие процедуры:
 - а) удаление влаги с поверхности насыщенного жидкостью образца;
 - б) взвешивание насыщенного образца;
- 5) гидростатическое взвешивание образца, погруженного в жидкость.

Рассмотрим последовательно каждую из перечисленных операций с целью выявления источников погрешностей и возможного их практического учета.

Вначале – общие соображения относительно допустимых погрешностей измерения открытой пористости. Из самой физической сущности коэффициента открытой пористости вытекает необходимость довольно высокой точности собственно измерительных операций по определению масс M_1 , M_2 , M_3 . Фактически точность определения пористости полностью зависит от точности взвешивания массы жидкости, заполняющей объем пустот в исследуемом образце, то есть значения

$$M_3 - M_1 = k_{\text{оп}} \rho_{\text{ж}} V_0, \quad (1)$$

где M_1 – масса сухого образца горной породы; M_3 – масса насыщенного жидкостью образца горной породы; $k_{\text{оп}}$ – коэффициент открытой пористости образца; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность насыщающей жидкости; V_0 – объем образца.

При $k_{\text{оп}} \cong 3\%$ и стандартном размере исследуемого образца цилиндрической формы 30×30 мм масса $M_3 - M_1 \cong 600$ мг. Очевидно, что для измерения такой массы с итоговой относительной погрешностью, например меньшей $\pm 1\%$, итоговая абсолютная погрешность с учетом всех источников не должна превышать ± 6 мг.

Погрешности, возникающие при сушке образцов

При нормальной температуре часть пустот образца из пористого материала всегда содержит влагу. Поэтому масса сухого (ненасыщенного жидкостью) образца должна определяться после его предварительной сушки. При этом вопрос о температуре сушки достаточно важен. К сожалению, значение температуры сушки, равное $(105 \pm 2)^\circ\text{C}$, рекомендуемое в [3, 6], не всегда обеспечивает требуемое удаление влаги из образца. Это особенно заметно при метрологической аттестации стандартных образцов (СО) открытой пористости (ОП), изготовленных из корунда и описанных в [4], которые используются для контроля качества исследований во многих петрофизических лабораториях. Метрологическая аттестация СО-ОП также осуществляется методом гидростатического взвешивания. В корундовых образцах с малой пористостью ($k_{\text{оп}} < 5\%$) при низкой температуре сушки сохраняются монослои воды, которые адсорбируются на поверхности канальных и тупиковых мельчайших пор. При исследовании образцов путем дифференциально-термогравиметрического анализа установлено, что удаление адсорбированной влаги происходит наиболее активно при температурах $330\text{--}370^\circ\text{C}$ и завершается только при температурах $500\text{--}550^\circ\text{C}$. Имеются также сведения [1], что для некоторых материалов при последующем после сушки прокаливании при температуре 800°C дополнительные потери веса вследствие удаления воды достигают $1,2\%$.

Таким образом, качество сушки образца (количество оставшейся в порах воды) контролируется не прямо, а лишь косвенно – путем поддержания установленной температуры в течение заданного времени и измерением массы образца в процессе сушки. Масса остающейся в порах жидкости увеличивает массу сухого образца (уменьшает коэффициент пористости) и является абсолютной систематической погрешностью, оценить количественно которую практически невозможно.

На практике для снижения этой погрешности поступают следующим образом. Проводят серию измерений массы сухого образца M_1 , каждый раз осуществляя сушку образца при постоянной температуре в течение определенного времени с последующим охлаждением в эксикаторе до нормальной температуры. Операция заканчивается, когда разница между последним и предшествующим измерениями не превышает заданного значения. В [3, 6] это значение принято равным 0,01 г для образцов массой свыше 20 г. Взвешивание образца в эксикаторе производится только после его охлаждения до нормальной температуры для улучшения воспроизводимости результатов измерений.

Погрешности, возникающие при насыщении сухих образцов

Целью насыщения исследуемого образца является заполнение его пустот жидкостью. Эффективность этой операции количественно можно характеризовать размером незаполненного жидкостью объема пустотного пространства. Здесь мы также встречаемся с невозможностью количественной оценки этого параметра и, следовательно, его прямого контроля. Имеется лишь возможность сохранения некоторой стабильности данной погрешности поддержанием определенного режима, то есть временем вакуумирования, уровнем вакуума, временем выдержки при атмосферном давлении погруженных в насыщающую жидкость образцов.

Погрешности взвешивания насыщенного образца

Операция взвешивания насыщенного образца – одна из главных операций, ограничивающих точность метода. Основным источником погрешности в этой операции является условность границы раздела между образцом и окружающим его пространством. Эта условность определяется наличием шероховатости поверхности образца, менисков жидкости в порах, выходящих на поверхность образца, и особенно необходимостью удаления жидкости с поверхности образца перед взвешиванием. Все перечисленные факторы случайны и контролю не поддаются.

Существует еще один фактор, влияющий на точность определения массы насыщенного жидкостью образца горной породы M_3 – это испарение жидкости с поверхности образца во время взвешивания.

Но он может быть компенсирован использованием специального герметичного сосуда (бюксы), куда помещается взвешиваемый образец. В этом случае

$$M_3 = M_{\Sigma} - M_6, \quad (2)$$

где M_{Σ} – суммарная масса бюксы и насыщенного образца; M_6 – масса бюксы.

Возможен и другой способ исключения влияния этого фактора. Он состоит в экспериментальном определении закономерности испарения, описываемый зависимостью

$$M_3 = f(t, T), \quad (3)$$

где t – время, через которое производится взвешивание; T – температура окружающего воздуха.

Значение M_3 при $t = 0$ (экстраполяция зависимости (3) при $T = \text{const}$ на $t = 0$) и будет истинным значением определяемой массы M_3 .

Погрешности гидростатического взвешивания

Процесс гидростатического взвешивания заключается в измерении массы насыщенного жидкостью образца, помещенного в насыщающую жидкость. Это делается с помощью специальной подвески (стальной или капроновой нити). Наличие подвески вносит методическую погрешность в определение M_3 и M_2 , которая может быть учтена следующим образом. Без учета подвески гидростатический вес насыщенного жидкостью образца $P_{го}$ равен

$$P_{го} = P_o - P_{oA}, \quad (4)$$

где P_o – вес насыщенного жидкостью образца; P_{oA} – архимедова сила, действующая на насыщенный жидкостью образец.

После деления обеих частей равенства (4) на g (ускорение свободного падения) получим выражение

$$M_2 = M_3 \rho_{ж} V_o. \quad (5)$$

С учетом подвески гидростатический вес насыщенного жидкостью образца $P_{го+п}$ будет равен

$$P_{го+п} = P_{o+п} - P_{oA} - P_{пA}, \quad (6)$$

где $P_{o+п}$ – суммарный вес насыщенного жидкостью образца и подвески, равный $P_o + P_{п}$; $P_{пA}$ – архимедова сила, действующая на погруженную в жидкость часть подвески.

Таким образом, масса образца при гидростатическом взвешивании с учетом массы подвески $M_{o+п}$ будет определяться выражением

$$M_{o+п} = M_3 + M_{п} - \rho_{ж}(V_o + V_{пж}), \quad (7)$$

где $M_{п}$ – масса подвески; $V_{пж}$ – объем части подвески, погруженной в жидкость.

С учетом вышеизложенного абсолютная погрешность (ΔM_2) определения массы образца при гидростатическом взвешивании без учета массы подвески определится выражением

$$\Delta M_2 = M_{п} - \rho_{ж} V_{пж}. \quad (8)$$

Объем части подвески, погруженной в жидкость ($V_{пж}$), легко определяется по диаметру нити подвески и длине подвески L , погруженной в жидкость:

$$L = 4D_o + h + h_m, \quad (9)$$

где D_o – диаметр образца (в выражении (9) предполагается, что диаметр и высота образца равны); h – высота уровня жидкости над образцом; h_m – высота мениска жидкости у подвески.

В выражении (9) не учитывается незначительная масса подвески, приходящаяся на узелок над образцом.

Смачиваемость подвески приводит к образованию мениска жидкости у подвески за счет поверхностного натяжения и, как следствие, к повышению уровня жидкости, создавая эффект увеличения глубины погружения подвески.

Оценку высоты подъема жидкости за счет поверхностного натяжения можно осуществить исходя из равенства энергии поверхностного натяжения, расходуемой на подъем определенной массы жидкости на некоторую высоту, и потенциальной энергии, запасенной этой массой жидкости. Опуская многоходовые промежуточные выкладки, отметим, что высота мениска жидкости у подвески с учетом физических свойств используемых насыщающих жидкостей находится в диапазоне (1,5–4,5) мм, что достаточно мало, чтобы существенно влиять на увеличение объема погруженной в жидкость подвески, а в конечном итоге и на определяемую пористость образца.

В табл. 1 приведены расчетные значения абсолютных погрешностей определения пористости для образца 30×30 мм, возникающих из-за неучета массы подвески, а в табл. 2 – эти же погрешности в относительном выражении.

Таблица 1

Абсолютные погрешности определения пористости
из-за неучета массы подвески, выраженные в процентах
пористости (все погрешности с отрицательным знаком)

Материал подвески	Длина подвески, мм						
	80	100	120	140	160	180	200
Сталь	0,024	0,029	0,035	0,041	0,047	0,053	0,059
Капрон	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,008

Таблица 2

Относительные погрешности определения пористости
из-за неучета массы подвески, проценты
(все погрешности с отрицательным знаком)

Материал подвески	Пористость образца, %	Длина подвески, мм						
		80	100	120	140	160	180	200
Сталь	2	1,18	1,46	1,76	2,05	2,35	2,64	2,95
	5	0,47	0,59	0,70	0,82	0,94	1,06	1,18
	10	0,24	0,29	0,35	0,41	0,47	0,53	0,59
	15	0,16	0,20	0,23	0,27	0,31	0,35	0,39
	20	0,12	0,15	0,18	0,20	0,24	0,26	0,30
	25	0,09	0,12	0,14	0,16	0,19	0,21	0,24
	30	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15	0,18	0,20
Капрон	2	0,17	0,21	0,26	0,30	0,34	0,38	0,42
	5	0,07	0,08	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17
	10	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,08
	15	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06
	20	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
	25	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
	30	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03

Существует еще один источник погрешностей при гидростатическом взвешивании образцов – это пузырьки воздуха, прилипающие к поверхности образца и элементам подвески. При радиусе пузырька 0,25 мм и количестве пузырьков, равном 10, которые будут иметь суммарный объем $6,5 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$, дополнительная погрешность гидростатического взвешивания составит 0,65 мг, что говорит о незначительности влияния этого фактора, хотя сама эта погрешность

соизмерима с погрешностью весов ВЛР-200, традиционно используемых при определении коэффициента пористости образцов размером 30×30 мм.

По своей природе и характеру проявления описанные погрешности являются систематическими, так как их значение и знак могут быть определены заранее, хотя в самом общем виде они являются случайными с математическим ожиданием, отличным от нуля. Случайность их обуславливается изменением уровня жидкости, количества и радиуса пузырьков от опыта к опыту и другими факторами, не всегда учитываемыми при исследованиях, которые в принципе могут быть выявлены и каким-то образом учтены лишь при достаточно большом количестве экспериментов в фиксированных воспроизводимых условиях.

В основу настоящей статьи положены результаты исследований и расчетов, выполненных автором совместно с бывшими сотрудниками отдела метрологии НПЦ «Тверьгеофизика» Владимиром Самуиловичем Зубаревым и Михаилом Викторовичем Лобачевым, находящимися в настоящее время на заслуженном отдыхе. Выражаю им искреннюю благодарность за совместную работу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бондаренко С. Л., Каплан Ф. С., Литовский Е. Я., Сабанин В. Н. Анализ погрешностей определения водопоглощения, кажущейся плотности, открытой и общей пористости методом гидростатического взвешивания. Ленинград: Всесоюзный институт огнеупоров, 1988.
2. ГОСТ 26450.1-85 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением.
3. ГОСТ 26450.0-85 Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств.
4. Козыряцкий Н. Г. Стандартные образцы для метрологического обеспечения измерений открытой пористости керна // НТВ «Каротажник». Тверь: Изд. АИС. 2009. Вып. 3 (180). С. 59–66.
5. СТО ЕАГО 011.02–2015 Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости, минералогической и объемной плотности.
6. СТО ЕАГО 011.01–2015 Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке образцов (проб) для определения петрофизических характеристик

Рецензент канд. техн. наук Т. Н. Нестерова

УДК 531.746,550.832,622.1:528.022.61

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

ГИБРИДНЫЙ МЕТОД ГРАДУИРОВКИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Представлен метод, заключающийся в совместном использовании итерационного варьирования констант для акселерометров и прямых измерений для градуировки магнитометров. Показано, что в отличие от стандартных методов, требующих позиционирования датчика относительно вектора измеряемого поля с высокой точностью, приведенный итерационный подход позволяет провести не менее качественную градуировку трехосевых акселерометров без знания точных положений по зенитным и визирным углам. Помимо этого, предложенный подход позволяет учесть нелинейность преобразования по всем осям в датчике. Приведенные результаты градуировки демонстрируют высокую точность и стабильность рассматриваемого гибридного метода.

Ключевые слова: инклинометр, градуировка, итерационный метод, нелинейность первичных преобразователей.

Введение

Метод прямых измерений – наиболее распространенный и обособенный на данный момент метод для градуировки трехосевых вектор-ориентированных преобразователей. Однако имеются и методы косвенных измерений, которые, в свою очередь, можно условно разделить на две группы:

- 1) со сбором градуировочных точек в произвольных положениях;
- 2) со сбором градуировочных точек во взаимно-перпендикулярных плоскостях.

В случае использования методов из первой группы имеется только один критерий, опираясь на который можно вычислить градуировочные коэффициенты – равенство единице суммы квадратов нормированных проекций преобразователей. Методы данной группы имеют достаточно широкое практическое применение [1, 7, 10], однако их точность недостаточна для использования в скважинной инклинометрии.

В случае методов из второй группы, условие ортогональности плоскостей сбора данных дает ряд косвенных признаков (равенство нулю проекций, располагающихся по нормали к плоскости вращения; неортогональность датчиков, оси которых располагаются в плоскос-

ти вращения; равенство единице суммы квадратов нормированных проекций), на основе которых может быть проведена достаточно точная градуировка.

Итерационный метод из данной группы с 1980-х годов успешно использует компания Weatherford [9] для градуировки скважинных инклинометров. Позже и отечественные авторы не раз высказывали мнение [4, 6] относительно возможности проведения подобной итерационной градуировки с обеспечением достаточной для использования в скважинной инклинометрии точностью.

Однако стоит отметить, что в вышеперечисленных случаях использовались или предполагались к использованию высоколинейные (с нелинейностью преобразования менее 0,01%) первичные преобразователи. Кроме того, рассматриваемые итерационные методы применимы к системам, измеряющим характеристики стационарных однородных полей [4, 6, 9]. Гравитационное поле отвечает данным требованиям, поэтому представляется возможным применить данные методы к блоку акселерометров. В то же время геомагнитное поле не является ни однородным, ни стационарным [2]. Итерационные методы можно было бы применить к магнитометрам только в случае создания однородного и стационарного магнитного поля с характеристиками, близкими к естественному геомагнитному полю [5, 8, 9].

В связи с вышеизложенным, авторы сделали попытку использования датчиков со значительно меньшей линейностью преобразования (0,2–0,5%) при условии учета в методе нелинейностей всех преобразователей. Кроме того, предполагалась градуировка инклинометров без создания искусственного однородного и стационарного магнитного поля, в связи с чем для градуировки магнитометров использовался метод прямых измерений. Совмещение итерационного метода варьирования констант для акселерометров и метода прямых измерений для градуировки магнитометров получило название гибридного метода градуировки.

Несложно понять, что в случае рассматриваемой градуировки по визирному и зенитному углам не требуются ни высокоточные лимбы, ни, как в случае современных калибровочных установок, высокоточные датчики углового положения. Необходимым остается только лимб по азимуту, обеспечивающий точность выставления, в три раза превышающую точность метода градуировки [3].

Теория метода

Как и любой метод градуировки, предложенный метод включает сбор градуировочных точек и непосредственный расчет градуировочных коэффициентов. Расчет, в свою очередь, состоит из поиска начального решения, предварительного расчета коэффициентов для акселерометров, расчета градуировочных коэффициентов для магнитометров во взаимосвязанном подборе коэффициентов для акселерометров. Критериями сходимости выступают суммы квадратов отклонений как для акселерометров, так и для магнитометров. Расчет имеет итерационный характер. Далее более подробно рассмотрены все приведенные пункты.

Сбор градуировочных точек осуществляется в два этапа. На первом этапе в трех взаимно-перпендикулярных плоскостях собираются данные в 24 положениях для акселерометров. Эти данные в дальнейшем используются и для градуировки магнитометров. На втором этапе собираются данные еще в 24 положениях для градуировки магнитометров.

Рассмотрим подробнее первый этап: при помощи угломер-квадранта блок датчиков выставляется в горизонтальное положение (ось Z перпендикулярна вектору гравитационного поля) и производится сбор градуировочных точек в визирной плоскости с шагом приблизительно в 45° . После возврата в исходное положение производится сбор точек с шагом приблизительно в 45° в зенитной плоскости. При возврате в начальное положение, после поворота блока датчиков на 90° по часовой стрелке производится сбор градуировочных точек в зенитной плоскости с шагом приблизительно в 45° .

Рассмотрим подробнее второй этап: сбор данных для градуировки магнитометров осуществляется путем установки инклинометра последовательно в положения 45° ; 135° ; 225° и 315° по азимуту и съемом в каждом из положений данных при значениях визирного угла 0° и 90° . Данная процедура повторяется для зенитных углов приблизительно 8° , 60° и 120° .

Из условий сбора данных видно, что на лимбах зенитного и визирного углов не требуются точные значения. Исключением является угол 90° между рисками 0° и 90° с целью перехода к третьей ортогональной плоскости вращения.

Таким образом, собирается 48 кадров данных, состоящих из 7 значений: $ax_k, ay_k, az_k, fx_k, fy_k, fz_k$ – проекции на одноосевые датчики (акселерометрические и магнитометрические соответственно) в единицах АЦП; T_k – значение температуры во время замера, снимаемое обычно с температурного датчика на плате, $k = \overline{0,47}$. Предполагается, что данные первичных преобразователей термокомпенсированы.

Поиск начального решения для системы акселерометров. Известно, что стандартные методы минимизации сложных многомерных функций предъявляют достаточно высокие требования к выбору начального решения. Поэтому перед тем как запускать основной итерационный расчетный блок, необходимо найти адекватное начальное решение. В качестве критерия используется отклонение расчетного (нормированного) модуля вектора от единицы в градуировочных точках:

$$F_s = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^7 |x_{i,j}^2 + y_{i,j}^2 + z_{i,j}^2 - 1|. \quad (1)$$

В формуле (1) $x_{i,j}, y_{i,j}$ и $z_{i,j}$ – нормированные проекции измеряемого (гравитационного) поля:

$$\begin{aligned} x_{i,j} &= (ax_{i,j} - b_x) / s_x + g_0(ay_{i,j} - b_y) / s_y + g_1 (az_{i,j} - b_z) / s_z; \\ y_{i,j} &= g_2(ax_{i,j} - b_x) / s_x + (ay_{i,j} - b_y) / s_y + g_3 (az_{i,j} - b_z) / s_z; \\ z_{i,j} &= g_4 (ax_{i,j} - b_x) / s_x + g_5(ay_{i,j} - b_y) / s_y + g_1 (az_{i,j} - b_z) / s_z, \end{aligned} \quad (2)$$

где b_x, b_y и b_z – коэффициенты сдвига нуля соответствующих осей; s_x, s_y и s_z – коэффициенты преобразования; g_k – коэффициенты неортогональности одноосевых датчиков относительно базовой системы координат датчика (Earth Coordinate System); индекс i отвечает номеру плоскости ($i = 0,2$), в которой производилось вращение, а индекс j – номеру точки в плоскости ($j = 0,7$).

Исходя из условия минимизации $F_s \rightarrow 0$, осуществляется итерационный поиск оптимальных $b_x, b_y, b_z, s_x, s_y, s_z$, а также $g_k, k = 0,5$. Стоит также отметить, что при нахождении коэффициентов сдвига и преобразования используются точки при экстремальных значениях первичных преобразователей (под номерами 0; 2; 4; 6), в то время как для поиска коэффициентов неортогональности используются оставшиеся точки (под номерами 1; 3; 5; 7).

Расчет коэффициентов сдвига, преобразования и неортогональности. Так как в случае итерационного метода не известны точные значения положения прибора в пространстве, а известно только то, что точки набирались в трех ортогональных плоскостях, необходимо вывести критерий сходимости из имеющейся информации, причем более совершенный, чем тот (1), который использовался при поиске начального решения.

Благодаря тому, что в каждой из плоскостей вращения нормализованная ось одного из датчиков располагается перпендикулярно к вектору измеряемого поля, а нормализованные оси двух других датчиков располагаются в плоскости вращения, становится возможным введение следующих критериев сходимости:

$$\begin{aligned} F_{0,j} &= q|x_{0,j}^2 + y_{0,j}^2 - 1| + (1 - q)z_{0,j}^2; \\ F_{1,j} &= q|x_{1,j}^2 + z_{1,j}^2 - 1| + (1 - q)y_{1,j}^2; \\ F_{2,j} &= q|x_{2,j}^2 + z_{2,j}^2 - 1| + (1 - q)x_{2,j}^2; \end{aligned} \quad (3)$$

где $x_{i,j}$, $y_{i,j}$ и $z_{i,j}$ вычисляются по формулам (2); q – весовой параметр, определяющий вклады каждого из критериев сходимости. Несложно понять, что каждое уравнение отвечает соответствующей ей плоскости вращения. Первые части в уравнениях (3) соответствуют условию равенства единице суммы нормированных проекций, располагающихся в плоскости вращения. Вторые части отвечают равенству нулю проекции, которая ортогональна направлению вектора поля. Суммирование приведенных критериев сходимости по 24 градуировочным точкам приводит к суммарному критерию сходимости, который и используется в методе, как основной при градуировке акселерометров:

$$F_{\theta} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^7 F_{i,j}. \quad (4)$$

Для поиска минимума функции (4) используется метод градиентного спуска.

Нахождение полиномов нелинейности. Очевидно, что записать зависимости нелинейности преобразования от угла относительно направления измеряемого вектора не представляется возможным. Однако ничто не мешает записать зависимости нелинейности непосредственно от величины проекции вектора поля на ось датчика. В то же время

вероятно наличие асимметрии в нелинейности преобразования у исследуемых датчиков. В связи с этим авторы предлагают использовать для учета нелинейности формулу, учитывающую возможную асимметрию показаний датчиков:

$$\begin{aligned}x'_{ij} &= x_{ij} + \sum_{k=0}^n x_{ij}^k (H(y_{ij}) c_{x,k}^{(0)} + H(-y_{ij}) c_{x,k}^{(1)}); \\y'_{ij} &= y_{ij} + \sum_{k=0}^n y_{ij}^k (H(x_{ij}) c_{y,k}^{(0)} + H(-x_{ij}) c_{y,k}^{(1)}); \\z'_{ij} &= z_{ij} + \sum_{k=0}^n z_{ij}^k (H(x_{ij}) c_{z,k}^{(0)} + H(-x_{ij}) c_{z,k}^{(1)}),\end{aligned}\tag{5}$$

где $H(\xi)$ – функция Хэвисайда; n – степень полинома нелинейности; x_{ij} , y_{ij} и z_{ij} – нормированные проекции, рассчитываемые по формулам (2); $c_{\xi k}^{(0)}$ и $c_{\xi k}^{(1)}$ – коэффициенты полиномов нелинейности, соответствующие разным полупространствам, выбор которых определяется через функцию Хэвисайда. К минусам данного представления можно отнести удвоение числа коэффициентов нелинейности. С другой стороны, эксперименты подтверждают большую адекватность такого представления, что выражается в большей скорости сходимости и существенно более низком пределе критерия сходимости (4). Расчет коэффициентов нелинейности также проводится по методу градиентного (наискорейшего) спуска.

Кривизна нелинейности первичных преобразователей обычно не превосходит третью–пятую степень, поэтому степень полинома n в формуле (5) нецелесообразно выбирать выше 5. В качестве начального решения можно использовать нулевое. В итерационном процессе используются оптимальные коэффициенты сдвига, преобразования и неортогональности, найденные в предыдущем пункте.

Градуировка магнитометров. Расчет нормированных проекций геомагнитного поля на оси системы магнитометров также производился по формулам, аналогичным (2), а нелинейностей преобразования по формулам, аналогичным (5).

Как уже говорилось выше, при калибровке магнитометров, в силу неоднородности и нестационарности геомагнитного поля, использовался метод прямых измерений. В качестве критерия сходимости использовалась сумма отклонений расчетных значений азимута (α_k) от калибровочных (α'_k) во всех 48 точках:

$$F_{\alpha} = \sum_{k=0}^{47} (\alpha_k - \alpha'_k - \Delta\alpha)^2, \quad (6)$$

где $\Delta\alpha$ – сдвиг нуля азимута установки относительно истинного положения магнитного меридиана (также вычисляется в результате итерационного процесса). Исходя из минимизации отклонений от известных значений азимута, выбираются границы по числу итераций при поиске неортогональности, коэффициентов преобразования и количества итераций по нелинейности акселерометров.

Проверка расчета зенитного угла осуществлялась при помощи угломер-квадранта. Для определения погрешности расчета азимута использовались отличающиеся от используемых в калибровке положения на лимбе азимута.

Результаты экспериментов и обсуждения

Для апробации гибридного метода градуировки на базе ООО «Нефтегазгеофизика» использовались собственные программа для градуировки и поверки MERA и инклинометрические датчики БИ-33. Градуировка 10 датчиков показала высокую стабильность нахождения градуировочных коэффициентов, включая коэффициенты нелинейности акселерометров и магнитометров.

При помощи вышеописанного гибридного метода удалось повысить точность инклинометрических датчиков более чем на порядок. Соотношение погрешностей по зенитному углу и азимуту до и после градуировки доходило до 30 к 1. Максимальная абсолютная погрешность по зенитному углу находилась в диапазоне между 0,053 и 0,151 град (рис. 1, а); максимальная абсолютная погрешность по азимуту находилась в диапазоне между 0,57 и 0,96 град (рис. 1, б).

Как показывают экспериментальные исследования, нелинейности используемых в БИ-33 акселерометров находятся в пределах $\pm 0,4\%$ от измеряемого диапазона (рис. 2). Кривые нелинейности носят достаточно регулярный характер. Нелинейности магниторезисторов (рис. 3) имеют меньшее значение ($\pm 0,2\%$ от измеряемого диапазона) и в то же время демонстрируют куда меньшую регулярность, а также большую асимметрию. По всей вероятности, меньшая регулярность и большая асимметрия связаны с влиянием естественных и техногенных вариаций геомагнитного поля.

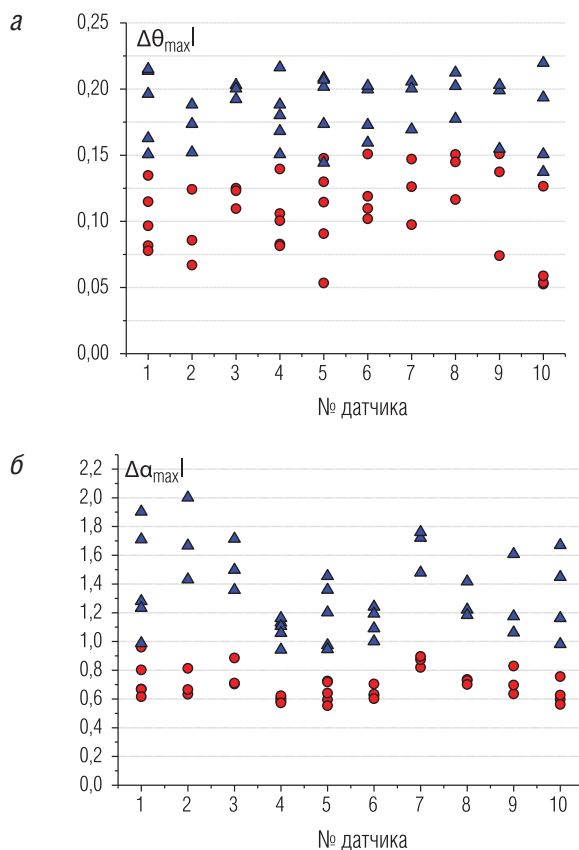


Рис. 1. Максимальные значения абсолютных погрешностей гибридного метода в случае повторных градуировок датчиков: а – по зенитному углу; б – по азимуту при $6,5 < \theta < 173,5$ град; $\blacktriangle$ – без учета нелинейности преобразования; $\bullet$ – с учетом нелинейности преобразования

Стоит отметить, что программа градуировки, по минимуму невязки с данными прямых измерений азимута, определяет сдвиг нуля азимута установки (6). Данная величина складывается из погрешности выставления нуля лимба азимута относительно текущего среднесуточного значения, а также суточной вариации вектора геомагнитного поля.

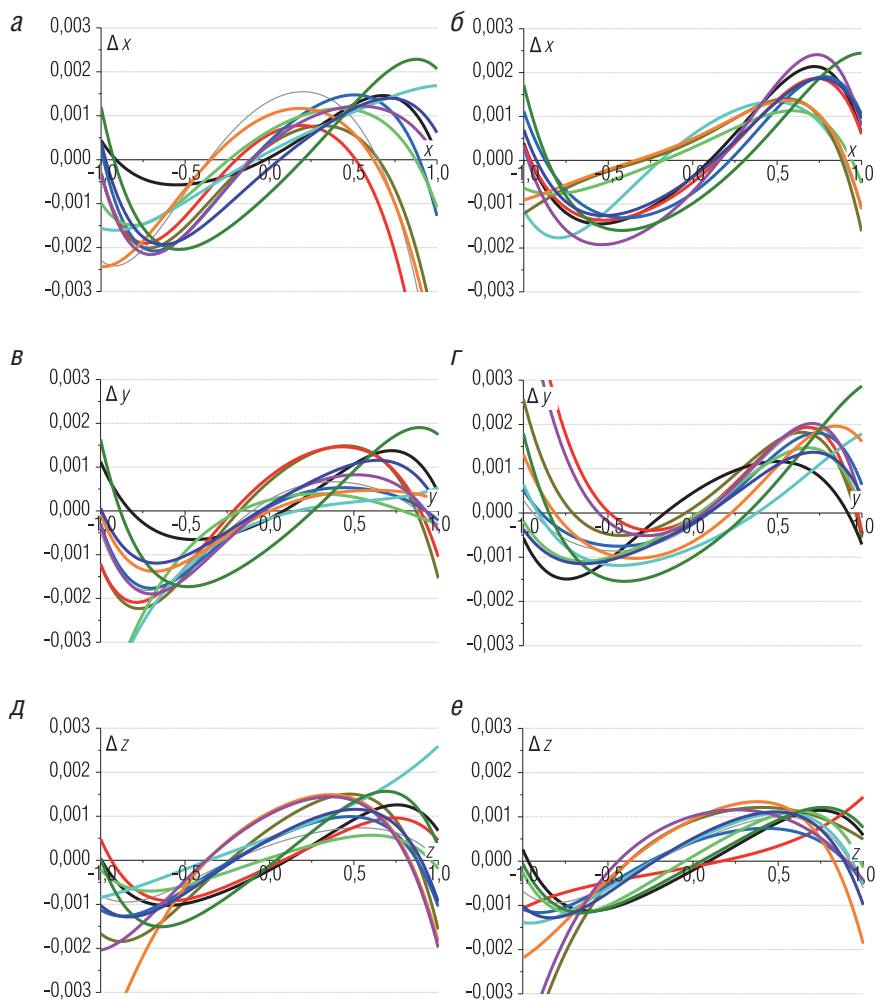


Рис. 2. Нелинейность показаний акселерометров в зависимости от величин проекций: *а*, *б* – нелинейность оси x акселерометра по полупространствам; *в*, *г* – нелинейность оси y акселерометра по полупространствам; *д*, *е* – нелинейность оси z акселерометра по полупространствам

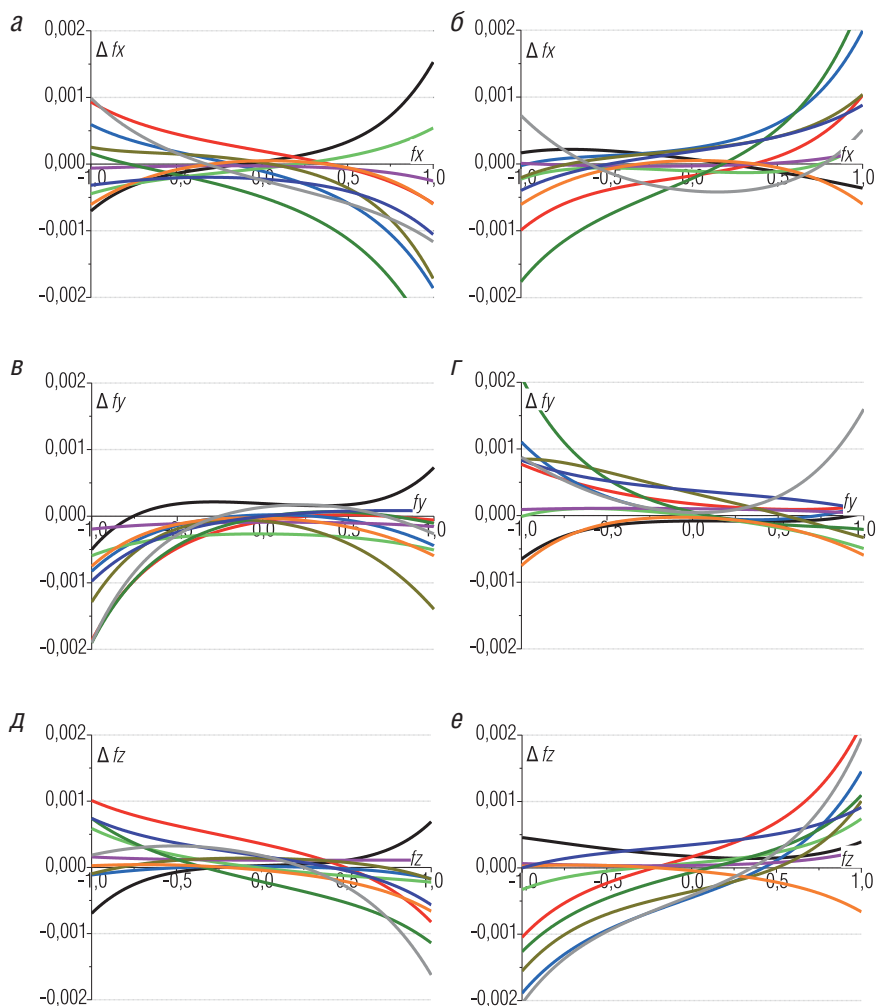


Рис. 3. Нелинейность показаний магниторезисторов в зависимости от величин проекций: *а, б* – нелинейность оси *x* магнитометра по полупространствам; *в, г* – нелинейность оси *y* магнитометра по полупространствам; *д, е* – нелинейность оси *z* магнитометра по полупространствам

В дальнейшем эта поправка может быть использована при поверке (при условии проведения поверки непосредственно после градуировки), а также при выставлении корректного нуля лимба азимута установки.

Заключение

Как показала градуировка десяти датчиков, предложенный гибридный метод позволяет достичь необходимых при геофизическом исследовании скважин показателей точности.

Итерационный подход, используемый при градуировке зенитного угла, может позволить отказаться от прецизионных лимбов зенитного и визирного углов, высокоточных датчиков углового положения, а также сложных фиксирующих устройств. Помимо этого ускоряется процесс градуировки, так как нет необходимости в точном выставлении градуировочных положений. Встроенный в метод гибридной градуировки анализ смещения нуля азимута установки может указать на имеющееся отклонение соответствующей величины от магнитного меридиана, а также помочь учесть данное смещение при поверке инклинометра.

Развитие подхода для градуировки инклинометров может быть связано с распространением итерационного метода на магнитометрические датчики инклинометра. Однако для этого необходимо создать достаточно однородное и стационарное магнитное поле с характеристиками, близкими к характеристикам естественного геомагнитного поля. Как показывают исследования других авторов [1, 3, 8], такая задача является вполне выполнимой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горянина К. И., Лукьянов А. Д. Метод идентификации параметров эллипсоида чувствительности MEMS датчиков ориентации в стохастической постановке // Международный студенческий научный вестник. 2017. № 4. С. 893–895.
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. № 9 (267). С. 172–185.
3. Козыряцкий Н. Г., Лобанков В. М. Поверочные схемы для средств измерений азимута, зенитного и визирного углов по стволу скважины: Стандарт СТО АИС 8.010.02.–2017. Тверь: Изд. АИС, 2017. 14 с.

4. Миловзоров Г. В. Инклинометрические преобразователи для систем управления бурением наклонно-направленных и горизонтальных скважин: Дисс. ... доктора технических наук Уфа, 1997. 434 с.
5. Миловзоров Г. В., Шапошников А. М. Моделирование калибровки трехкомпонентного магнитометра, основанной на применении системы колец Гельмгольца // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2010613391. М.: РосАПО, 2010.
6. Редькина Т. А., Миловзоров Д. Г., Садрутдинов Р. Р., Морозова Е. С. Метод итерационного варьирования констант в трехкомпонентных векторно-измерительных преобразователях // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2 (24). С. 138–143.
7. Чекасин А. И. Повышение точности инклинометров с помощью калибровки // Средства контроля и измерения. 2010. № 3. С. 80–83.
8. Шапошников А. М. Исследование инклинометрических преобразователей с трехкомпонентными магнитометрами в программно-управляемых магнитных полях: Дисс. ... кандидата технических наук. Уфа, 2011. 154 с.
9. Estes R., Walters P. Improvement of Azimuth Accuracy by Use of Iterative Total Field Calibration Technique and Compensation for System Environment Effects // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, 1989.
10. Parameters and Calibration of a Low-g 3-axis Accelerometer. AN4508. Application note. STMicroelectronics. 2014. 13 p. // goo.gl/MSzWvg

Рецензент доктор техн. наук В. М. Лобанков