

УДК 531.7.08:531.746

*А. Б. Королев, И. В. Гринев, В. Н. Ситников**ООО «Нефтегазгеофизика»**А. Н. Тихомиров**ПАО «ИНЭУМ им. И. С. Брука»*

МЕТРОЛОГИЧЕСКАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ПОЛНОГО ЦИКЛА ПОДГОТОВКИ ИНКЛИНОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрены основные требования к организации метрологической лаборатории для калибровки инклинометрических систем высокой точности, построенных на основе акселерометров и магнитометров. Предложен комплексный подход по уменьшению влияния на калибруемые датчики неблагоприятных естественных и техногенных факторов через совершенствование конструкции лаборатории, набора оборудования и правил эксплуатации.

Ключевые слова: инклинометр, метрология, метрологическая лаборатория.

Введение

Точность инклинометрических исследований во многом зависит от подготовки и периодической проверки инклинометрического датчика, входящего в состав инклинометра. В полный цикл подготовки инклинометрического датчика входят температурная коррекция и геометрическая калибровка, проверка температурных зависимостей и геометрической калибровки, периодическая поверка.

Точность и стабильность указанных работ зависят в основном от квалификации наладчика, а также от средств и условий проведения работ. В данной статье рассматривается комплексный подход к обеспечению средств и условий проведения метрологических работ.

В перечень необходимых средств входят инклинометрическая установка, векторный магнитометр, средства точного измерения зенитного угла и азимута, средства дистанционного контроля и управления. Под условиями подразумевается создание стандартных условий по температуре, отсутствие критических значений дополнительных магнитных полей, а также вибрационных воздействий техногенного характера. Помимо этого, должна быть налажена система информирования и оповещения наладчика о превышении основных важных параметров. Таким образом, необходимым является наличие средств мониторинга

состояния магнитного поля. Минимальный набор средств мониторинга включает векторный магнитометр, установленный в лаборатории, и доступ к сайтам с информацией о магнитных бурях, локальных параметрах и годовых вариациях геомагнитного поля (ГМП).

Для обеспечения таких условий необходимо учитывать такие факторы, как удобство проведения работ, а также минимизацию времени и финансовых затрат как на обеспечение, так и на проведение работ. Помимо этого, должны учитываться долговечность и стабильность функционирования метрологической лаборатории и используемого оборудования.

Классификация требований

Требования, предъявляемые к метрологической лаборатории и ее обеспечению, можно условно разделить на следующие составляющие: условия окружающей среды, оборудование, конструкция и режим эксплуатации. В таблице приведено сравнение требований к стандартной (минимальной по требованиям и обеспечению) и расширенной лабораториям.

Таблица

Сравнение требований к лабораториям

Стандартная лаборатория	Расширенная лаборатория
Подготовительные работы	
	Съемка градиента магнитного поля
Особенности расположения и конструкции здания лаборатории	
Отсутствие массивных ферромагнитных элементов конструкции	Отсутствие массивных ферромагнитных элементов конструкции
	Отдельное здание
	Достаточное расстояние до массивных ферромагнитных материалов
	Отдельный фундамент для установки
Средства создания условий окружающей среды	
Обогреватель	Обогреватель
	Кондиционер
Средства мониторинга условий окружающей среды	
Термометр	Термометр
	Векторный магнитометр
	Интернет-источник: магнитные бури
	Интернет-источник: эволюция ГМП

Продолжение таблицы

Используемое оборудование	
Калибровочная установка	Калибровочная установка
Угломер-квадрант	Угломер-квадрант
Буссоль	Буссоль
Ноутбук с необходимым ПО	Ноутбук с необходимым ПО
Термостат с ПИД-регулятором	Термостат с ПИД-регулятором
	Презентер
	Соединение для удаленной работы
Иные требования	
	Заземление установки
	Экранирование проводов

Обеспечение необходимых параметров окружающей среды

Магнитное поле. Магнитное поле в месте расположения установки должно иметь неоднородность не более 20 нТл/м . Измерения неоднородности в месте предполагаемого строительства лаборатории можно проводить по объемной сетке с шагом в $1\text{--}2 \text{ м}$ при помощи высокоточного модульного (оверхаузеровского) магнитометра.

Место должно быть лишено существенных нестационарных техногенных влияний. Например, известно, что каротажный подъемник способен оказывать влияние на качество наладочных работ на расстоянии менее 28 м от калибровочной установки [1]. То же касается грузовиков и другой тяжелой техники. Понятно, что массивные склады ферромагнитных материалов (труб и иных тяжелых комплектующих) способны оказывать влияние и на больших расстояниях. Легковые автомобили должны быть отнесены на расстояние не менее 20 м . В идеале территория должна быть огорожена, чтобы не было возможности подъехать на машине, складировать ферромагнитные материалы. Кроме этого, источниками возмущений ГМП могут быть линии электропередач, трансформаторные будки, силовые кабели и т. п.

При изготовлении лаборатории не используются массивные ферромагнитные элементы конструкции. Стол, стулья не должны содержать большое количество ферромагнитных материалов. Ноутбук, кондиционер, лампы освещения, угломер-квадрант, пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор с преобразователем тока располагаются на максимально возможном удалении

от калибровочной установки. Провода электропитания должны быть экранированы, а установка – заземлена.

Гравитационное поле. Обычно при рассмотрении необходимых условий в инклинометрической лаборатории вопрос стабильности гравитационного поля не рассматривается. Однако это неверно, так как возможны случаи, когда на качество наладочных работ влияют техногенные источники вибраций, которые вносят погрешности в измеряемый вектор гравитационного поля Земли.

Так что в области расположения инклинометрической лаборатории должны отсутствовать источники вибрации. Вытяжные двигатели, в особенности в отсутствие амортизирующих устройств, способны создавать вибрации, серьезно влияющие на показания акселерометров. Такие воздействия могут передаваться по земле на расстояния 10 м и более (в зависимости от мощности двигателя, эффективности амортизаторов, массы фундамента установки, особенностей грунта и самой установки). Схожая ситуация наблюдается в случае расположения вблизи от лаборатории станков, являющихся источниками ударов или вибрации. Кроме того, лаборатория не должна располагаться поблизости от железнодорожного полотна (трамвай, поезда), так как железнодорожный транспорт тоже создает ощутимый уровень вибрационного загрязнения.

В данном пункте также стоит коснуться смежной проблемы, связанной с центробежными силами. Съём данных инклинометра необходимо производить после полной фиксации датчика в требуемом положении.

Температурное поле. Значение и стабильность температуры в инклинометрической лаборатории влияют не только на комфортность проведения работ оператором, но и на качество этих работ, а также на состояние используемой аппаратуры. Поэтому стабильная комнатная температура необходима для проведения корректных температурных и геометрических градуировок.

Высокие значения температуры (28 °С и выше) в летний сезон создают проблемы при температурной коррекции прибора, такие как невозможность съема первой точки температурных зависимостей при стандартной комнатной температуре, низкая скорость снижения температуры при съеме данных или калибровке на охлаждении датчика. Высокие значения температуры в метрологии также негативно влияют и на качество геометрической настройки, так как нет возможности проведения градуировки при комнатной температуре.

Низкие температуры в зимний сезон (15°C и ниже) неблагоприятны для наладочных работ и калибровочной установки: невозможно провести калибровку при корректной комнатной температуре; появляется возможность создания напряжений в установке с последующим увеличением погрешности воспроизведения углов.

В то же время для экономии энергии на обогрев и кондиционирование значения поддерживаемой температуры в разные сезоны могут быть разными: $20\text{--}22^{\circ}\text{C}$ зимой и $22\text{--}25^{\circ}\text{C}$ летом. Оптимальной стабильностью поддержания температуры можно считать $\pm (1\text{--}1,5)^{\circ}\text{C}$.

Обеспечение необходимым оборудованием

Для наладочных работ необходимы:

- инклинометрическая установка с необходимыми точностями воспроизведения углов, а также с возможностью корректировки нулей лимбов базовых углов. Установка должна быть заземлена. Объем, в котором находятся магнитометры датчиков при вращениях, должен быть по возможности минимизирован;
- ноутбук с необходимым программным обеспечением, включающим программы температурной и геометрической настроек, программу по работе с векторным магнитометром. Ноутбук должен иметь выход в сеть Интернет для доступа к сайту с прогнозом и мониторингом магнитных бурь, а также для возможности удаленного управления операционной системой ноутбука;
- презентер для дистанционной работы с калибровочной программой (съема точек в процессе калибровки);
- угломер-квадрант (оптический) с допускаемой абсолютной погрешностью не менее $\pm 30''$ для выставления нуля и контроля показаний зенитного и визирного углов;
- буссоль с допускаемой абсолютной погрешностью не менее $\pm 10'$ для корректировки нуля лимба азимута установки. Соответствующая корректировка нуля может быть произведена (причем более точно) при помощи специального алгоритма программы геометрической настройки на основе набора снятых данных.

Для обеспечения условий окружающей среды нужны:

- инфракрасные лампы либо нагреватель с предпочтительно керамическим рабочим телом для обогрева в холодный сезон;

– кондиционер для снижения температуры в жаркий сезон. Кондиционер, как и нагреватели, должен быть максимально удален от калибровочной установки, чтобы не вносить возмущения в магнитное поле;

– для проведения температурной градуировки необходимы термостат с возможностью размещения на калибровочной установке, а также нагреватель, встроенный в шасси, либо внешний шкаф с нагревателем, при помощи которого можно оценить температурную поправку. Кроме того, необходимы два ПИД-регулятора: один для температурной коррекции датчика, а другой для термокомпенсации векторного магнитометра.

Средства мониторинга условий окружающей среды. Для мониторинга магнитной обстановки необходимо наличие соответствующих средств:

– векторного магнитометра, ноутбука с доступом к сайтам по мониторингу магнитных бурь [4] и годовых вариаций ГМП [6];

– векторного магнитометра с разрешающей способностью не менее 1 нТл, термокомпенсированного либо с размещением в термостате и поддержанием постоянной температуры. Используется для мониторинга естественных и техногенных вариаций геомагнитного поля (естественные вариации складываются в основном из суточных вариаций и магнитных бурь [4], вызванных изменениями в активности Солнца);

– в метрологической лаборатории в доступном месте должен располагаться термометр с допускаемой абсолютной погрешностью показаний не ниже $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

В случае отклонения температуры и/или параметров магнитного поля от стандартных (геомагнитная буря, критические техногенные магнитные влияния) на ноутбуке должно выводиться соответствующее предупреждение.

Иное оборудование. Стол и стулья не должны содержать большое количество ферромагнитных материалов. Метрологическая лаборатория должна иметь журнал проводимых наладочных работ и экспериментов, инструкции к используемому оборудованию, а также необходимые канцелярские принадлежности. На случай, если возможно движение или остановка транспорта вблизи лаборатории, необходима переносная стойка со знаком, предупреждающим о проведении метрологических работ.

Требования к конструкции лаборатории

Материалы и теплоизоляция. Инклинометрическая лаборатория должна представлять отдельное здание каркасного типа или здание из газосиликата (газобетона). При строительстве необходимо минимизировать количество материалов, содержащих ферромагнитные материалы. В случае каркасного исполнения стены должны быть хорошо утеплены. Крыша и пол также должны быть хорошо утеплены для минимизации теплообмена с окружающей средой и, как следствие, снижения затрат на обогрев и кондиционирование. Количество теплоизолирующего материала должно рассчитываться с учетом климатических условий места строительства. Желательно наличие тамбура для минимизации потерь тепла в зимнее время.

Размеры лаборатории. Минимальный размер (4×4 м) обусловлен необходимостью удаления от калибровочной установки ноутбука, нагревателя, кондиционера и другого оборудования на расстояние не менее 2,5 м. Значительное увеличение объема лаборатории связано с дополнительными расходами как на строительство, так и на отопление и кондиционирование.

Отдельный фундамент под установку. В идеале требуется отдельный массивный фундамент под установку, развязанный с полом лаборатории. Пол лаборатории должен быть утеплен, а шов между полом и фундаментом установки герметизирован гибким герметиком или монтажной пеной для минимизации температурных мостиков. Векторный магнитометр предлагается располагать в непосредственной близости от установки на том же фундаменте.

Другие требования. Освещение должно удовлетворять требованиям для промышленных предприятий. Провода электропитания должны быть экранированы для минимизации помех и наводок на чувствительные компоненты инклинометрических датчиков и векторного магнитометра. Необходимо наличие вентиляционного отверстия с утепленной пробкой для периодического проветривания помещения.

Требования к эксплуатации

Проверка условий проведения работ. Одежда оператора не должна содержать магниты или массивные элементы из ферромагнитных материалов (магнитные застёжки, массивная пряжка ремня и т. п.). Перед началом работ оператор должен убедиться, что параметры

магнитного поля и температура находятся в рамках допуска, а рядом с установкой не находятся ферромагнитные материалы.

Желательно, чтобы величина планетарного Кр-индекса не превышала 3. В противном случае с высокой степенью вероятности будут наблюдаться дополнительные погрешности определения магнитного азимута и магнитного визира. Данная рекомендация не актуальна при использовании параллельного мониторинга вариаций ГМП [2, 3, 5] с корректировкой снятых значений. Также при помощи векторного магнитометра необходимо проверять отсутствие критических техногенных воздействий на магнитное поле в лаборатории.

Для мониторинга состояния ГМП в текущий трехчасовой интервал в лаборатории должен быть доступ к соответствующему интернет-ресурсу [4].

Выбор оптимального времени для проведения работ. При выборе оптимального времени проведения работ необходимо учитывать особенности суточных вариаций ГМП [2, 3, 5]. Минимум вариации приходится на период с 9 до 10 ч утра, а максимум – на период с 14 до 15 ч по местному времени. Минимальное отклонение от среднего значения склонения наблюдается в период между 20.00 и 4.00 ч. Амплитуда суточных вариаций достигает максимума в летний сезон, минимума – в зимний. Амплитуда вариаций растет по мере приближения к магнитному полюсу. Напоминаем, что фиксировать и учитывать суточные вариации можно при наличии векторного магнитометра.

Профилактические работы. Положение нулей лимбов установки требует периодической проверки. Так, на положение нуля лимба азимута влияет годовой уход склонения [6], вызванный дрейфом магнитных полюсов Земли. Он неодинаков для различных точек на поверхности Земли, и на территории России меняется от $-0,35^\circ$ в год на Чукотском п-ве до $+0,25^\circ$ в год на Кольском п-ве (данные для 2022 г.).

Корректировка положения нуля лимба должна проводиться раз в полгода. При выборе времени корректировки необходимо помнить о суточных вариациях ГМП, минимальное отклонение от среднего значения которых наблюдается в период между 20.00 и 4.00 ч по местному времени. Таким образом, данное время можно считать оптимальным для выставления нуля азимута установки. Другим подходящим временем можно считать время в районе зенита Солнца для рассматриваемой местности. Раз в полгода требуется проверка нулей лимбов зенитного и визирного углов при помощи угломер-квадранта.

Иные требования. Должен быть рассмотрен перечень действий на случай долговременного отключения электричества в зимний сезон, исходя из условия, что калибровочная установка и некоторое другое оборудование могут потерять свои свойства при снижении температуры ниже определенного порога. Также должен быть рассмотрен вариант действий во время пожара.

Выводы

Рассмотрен комплекс необходимых мер по подготовке рабочей площадки и обеспечению условий, необходимых для калибровки акселерометрических и магнитометрических первичных преобразователей. Данный комплексный подход позволяет повысить показатели точности температурной коррекции и геометрической настройки на десятки процентов, а также снизить издержки на проведение работ вследствие уменьшения количества неудачных калибровок, оптимизации и частичной автоматизации процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гарейшин З. Г., Газизов М. Н. Исследования влияния магнитной массы каротажного подъемника на погрешности калибровки скважинных инклинометров // Нефтегазовое дело. 2012. № 6. С. 313–332.
2. Гарейшин З. Г. Совершенствование метрологического обеспечения инклинометрии нефтегазовых скважин: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2006. 193 с.
3. Гринев И. В., Королев А. Б., Ситников В. Н., Тихомиров А. Н. Мониторинг вариаций геомагнитного поля с целью комплексного уточнения инклинометрических измерений // НТВ «Каротажник». 2016. Вып. 9 (267). С. 172–185.
4. Сайт лаборатории рентгеновской астрономии Солнца Физического института Российской академии наук: Магнитные бури онлайн. https://tesis.xras.ru/magnetic_storms.html
5. Центр прогнозов космической погоды «ИЗМИРАН»: Вариации магнитного поля Земли. <http://forecast.izmiran.ru>
6. British Geological Survey, Natural Environment Research Council: World Magnetic Model 2015 Calculator. http://www.geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/wmm_calc.html

Рецензент доктор техн. наук, проф. В. М. Лобанков