

*В. С. Литвинов<sup>1\*</sup>, Д. В. Тейтельбаум<sup>1</sup>, А. А. Власов<sup>1</sup>*

## **Программно-аппаратное и метрологическое обеспечение скважинного инклинометра «Луч»**

<sup>1</sup> Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч»,  
г. Новосибирск, Российская Федерация  
\*e-mail: contact@looch.ru

**Аннотация.** Научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч» разрабатывает и производит с 2014 года телеметрическую систему, эксплуатируемую в процессе бурения нефтегазовых скважин. Инклинометр (датчик ориентации) является узлом, необходимым для проведения траектории наклонно-направленной или горизонтальной скважины в соответствии с проектом. В данной работе рассматривается магнитометрический инклинометр собственного производства, созданный для замены модели APS760 (Applied Physics Systems, Inc, США) с целью упрощения процесса ремонта и модернизации телесистем. Приводятся общие сведения о видах и назначении инклинометров; сведения об разрабатываемом приборе; характеристики датчиков ускорения и магнитного поля, находящихся под влиянием температуры; методика компенсации температурного дрейфа; методика геометрической калибровки, применимой для наклонно-поворотных установок с рядом возможных дефектов; результаты всех калибровок и успешно проведенных в паре с инклинометром APS760 полевых испытаний в процессе бурения скважины.

**Ключевые слова:** скважинный инклинометр, LWD-системы

*V. S. Litvinov<sup>1\*</sup>, D. V. Teytelbaum<sup>1</sup>, A. A. Vlasov<sup>1</sup>*

## **Software, hardware and metrological support of the downhole inclinometer "Looch"**

Scientific-production enterprise of geophysical equipment "Looch", Novosibirsk, Russian Federation  
\*e-mail: contact@looch.ru

**Annotation.** Since 2014, the SPE "Looch" has been developing and manufacturing a LWD telemetry system used in the process of drilling oil and gas wells. The inclinometer (directional sensor) is a node necessary for conducting the trajectory of a directional or horizontal well in accordance with the project. In this paper, we consider a magnetometric inclinometer of our own production, designed to replace the APS760 model (Applied Physics Systems, Inc, USA) in order to simplify the process of repair and modernization of LWD systems. This paper provides general information about the types and purpose of inclinometers; information about the developed device; characteristics of acceleration and magnetic field sensors under the influence of temperature; temperature drift compensation method; geometric calibration technique applicable to tilt-rotary installations with a number of possible defects; the results of all calibrations and field tests successfully carried out in tandem with the APS760 inclinometer.

**Keywords:** directional sensor, LWD systems

## *Введение*

В настоящее время бурение наклонно-направленных и горизонтальных скважин на нефть и газ осуществляется с помощью телеметрических систем, регистрирующих и передающих на поверхность сигналы, соответствующие измерениям внизу буровой колонны. Оперативное получение параметров в процессе бурения позволяет корректировать траекторию скважины для проведения её по продуктивной части пласта-коллектора и в соответствии с технологическими требованиями.

Важным методом изучения скважины в процессе бурения является инклинометрия [1], позволяющая определить направление бурового инструмента в виде трёх углов. Зенитный угол определяет наклон относительно линии отвеса, азимут определяет направление в горизонтальной плоскости, угол установки отклонителя определяет поворот прибора вокруг собственной оси и используется для задания направления бурения, в котором происходит искривление траектории ствола скважины.

Состав датчиков скважинных инклинометров, измеряющих данные параметры, может быть разным. Существуют реализации, оснащенные акселерометрами и гироскопами (УГИ 42.03) [2] или акселерометрами и магнитометрами (КВАРЦ 36.04, APS760) [3], [4]. Гироскопические инклинометры применяются преимущественно при геофизических исследованиях уже разбуренных или частично обсаженных скважин, в то время как феррозондовые используются в процессе бурения.

К преимуществам гироскопических инклинометров можно отнести малую чувствительность измерений к вибрациям и ударам, высокую допустимую скорость проведения каротажа. Однако они обладают недостатком – погрешность определения углов ориентации у приборов этого типа возрастает вместе с ростом перемещения. Измерения у магнитометрических инклинометров проводятся независимо друг от друга, поэтому они лишены указанного недостатка. [1]

Новосибирское научно-производственное предприятие геофизической аппаратуры «Луч» производит собственные телеметрические системы, реализующие методы электрического, радиоактивного, акустического каротажа, а также выполняющие инклинометрические замеры. Ранее для проведения инклинометрии в состав телесистем входили датчики APS-750, APS-760 (продукция фирмы Applied Physics Systems, США), но в связи с санкционными ограничениями, запрещающими продажу данного оборудования и в связи с невозможностью самостоятельного ремонта и тесной интеграции с имеющимся оборудованием, возникла потребность в разработке собственного инклинометра.

Целью данной работы является упрощение ремонта и модернизации оборудования НПП ГА «Луч», оснащенного модулями измерения ориентации, путем создания собственной технологии производства инклинометров.

На предприятии была подготовлена конструкция прибора, электрические схемы, изготовлены платы и произведен монтаж. В рамках данной работы было разработано недостающее ПО и методика настройки, проведены испытания инклинометра.

Для достижения результата нужно было пройти ряд этапов: разработка программы для микроконтроллера; разработка ПО для получения измерений с прибора на ПК и сервисного обслуживания; исследование характеристик прибора; определение методики калибровки; реализация ПО для калибровки; проведение натурного эксперимента.

### *Методы и материалы*

В состав инклинометра НПП ГА «Луч» (рис. 1) входят три одноосевых датчика ускорения маятникового типа и один трехосевой феррозондовый магнитометр, размещенные в разных концах прибора.



Рис. 1. Инклинометр производства НПП ГА «Луч».

Это сделано для исключения влияния магнитного поля, создаваемого током через катушки акселерометров, на показания магнитометра. На шасси установлено два термодатчика, измеряющих температуру в удаленных друг от друга точках прибора. Также в состав прибора входят платы источников питания, аналого-цифрового преобразования. Обработка сигналов производится на микроконтроллере STM32L496. Инклинометр оснащен совместимым с используемым ранее в APS760 физическим интерфейсом для обмена данными. Протокол взаимодействия проприетарный, унифицированный для всех компонент телеметрической системы.

Инклинометр не производится как цельный модуль телеметрической системы, а монтируется в качестве узла в модуль памяти и измерений (МПИ). Вдоль всего прибора проходят транзитные линии питания телесистемы – от батарей, расположенных выше в компоновке, к модулям, расположенным ниже. Для исключения магнитного поля, создаваемого током через транзитные линии питания, инклинометрический замер проводится в течение 500 мс «тишины», на время которой транзитный ток прекращается.

Подключение прибора к ПК возможно, как напрямую, так и опосредованно через интерфейс МПИ. Для пользователей был разработан плагин ПО Colibri5 [5], позволяющий производить опрос датчиков, калибровку, сервисное обслуживание.

*Требуемые погрешности* измерения для нового инклинометра аналогичны APS760: зенит:  $\pm 0,1^\circ$ ; азимут:  $\pm 0,3^\circ$  (при зените  $90^\circ$ ),  $\pm 1^\circ$  (при зените  $10^\circ$ ),  $\pm 2^\circ$  (при зените  $5^\circ$ ); угол установки отклонителя:  $\pm 0,5^\circ$ .

К скважинным инклинометрам, применяемым в процессе бурения, предъявляется требование возможности работы в широком диапазоне температур  $0^\circ\text{C}$  до  $150^\circ\text{C}$ . Изменение рабочей температуры инклинометра ведет к возникновению дрейфа в измерительной части. Например, для акселерометра JAE в документации приведены следующие верхние границы для дрейфов:

- Масштабный коэффициент:  $\pm 300 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$  при температурах от  $100^\circ\text{C}$
- Смещение нуля:  $\pm 100 \text{ мк g}/^\circ\text{C}$ .

При использовании таких датчиков, при повышении температуры с комнатных  $20^\circ\text{C}$  до  $120^\circ\text{C}$  возможен дрейф с  $1,0000 \text{ г}$  до  $1,0400 \text{ г}$  в вертикальном положении датчика и с  $1,0000 \text{ г}$  до  $1,01 \text{ г}$  в горизонтальном положении датчика. Такая величина дрейфов критично сказывается на качестве измерений, поэтому требует компенсации. Было принято решение использовать программный метод компенсации дрейфов, как наиболее гибкий.

В используемую температурную модель в соответствии с паспортом акселерометров и магнитометров были включены масштабный коэффициент и смещение нуля, зависящие от температуры:

$$m(T) = k(T) * m(T_k) + b(T), \quad (1)$$

где  $T$  -- температура окружающей среды,  $^\circ\text{C}$ ,  $m(T)$  -- сигнал датчика при данной температуре,  $\text{г}$  или  $\text{мкГл}$ ,  $T_k$  -- комнатная температура,  $^\circ\text{C}$ ,  $k(T)$  -- масштаб,  $b(T)$  -- смещение нуля,  $\text{г}$  или  $\text{мкГл}$ .

$k(T)$ ,  $b(T)$  вычислялись на основе данных, полученных в следующем эксперименте. Прибор нагревался закрепленным в наклонной печи, установленной под углом  $45^\circ$  к горизонту, и выполненной из немагнитных материалов, до температуры  $150^\circ\text{C}$ . Затем показания датчиков фиксировались в процессе плавного остывания в течение 12 часов до комнатной температуры. Показания регистрировались в течение нескольких циклов нагрева-остывания, на каждой итерации изменялось положение прибора для охвата максимально широкого диапазона значений датчиков (акселерометров и магнитометров).

Затем определялись  $k(T)$  и  $b(T)$  для каждой из температур в диапазоне  $30..150^\circ\text{C}$  с шагом в  $2^\circ\text{C}$ . Для определенности системы брались пары записей, соответствующих разным положениям прибора.

По результатам экспериментальных циклов нагрева-остывания (рис. 2, рис. 3) функции  $k(T)$ ,  $b(T)$  для акселерометров и магнитометров были аппроксимированы многочленами третьей степени. Коэффициенты многочленов записываются в ПЗУ микроконтроллера. В процессе работы микропрограммы определяются актуальные значения  $k(T)$ ,  $b(T)$  для каждого из 6 датчиков в зависимости от сигнала с термодатчика, размещенного рядом с акселерометрами или магнитометрами, и смоделированный дрейф вычитается из сигнала, поступающего с АЦП.

Также была сформирована методика проведения термокалибровки инклинометра:

1. Запись сигналов датчиков в процессе остывания в двух положениях, широко охватывающих диапазон сигналов датчиков при физических ограничениях печи.

- а. Зенит= $45^\circ$ , Азимут= $45^\circ$ , Поворот вокруг оси= $45^\circ$

б. Зенит=135°, Азимут=135°, Поворот вокруг оси=225°

2. Подбор калибровочных параметров на основании данных двух записей; запись полученных настроек в память инклинометра.

3. Дополнительный цикл нагрева-остывания в третьем положении, для экспериментального подтверждения успешного подбора.

Разброс параметров электронных компонент, неточности в механическом исполнении влекут за собой наблюдаемую неортонормированность осей датчиков, и несовпадение систем координат датчиков с системой координат прибора, поэтому требуется дополнительная коррекция.

Для исправления этих неточностей, приведения систем координат используется линейное преобразование для триады акселерометров и триады магнитометров. Процесс калибровки проходит на специальной установке, позволяющей задавать пространственную ориентацию прибора. На практике мы встречались с тремя установками, обеспечивающими *точность* задания углов 0.05°, 0.05° и 0.01°. Однако *погрешность* задания углов в двух из трех установок превышала в несколько раз точность, несмотря на то, что поверка установок проводится регулярно. Такое возможно по причине активного использования установок, дрейфа юстировок, изменчивого магнитного поля в лаборатории. Частые неисправности – смещенные лимбы, неравномерность разметки на лимбах, расположение основания установки в негоризонтальной плоскости. Но такие установки обеспечивают минимальные биения осей вращения.

Из-за необходимости работы с имеющимся оборудованием к программе для калибровки было предъявлено требование учитывать в модели смещение лимбов, негоризонтальность основания установок, наличие небольших неоднородностей магнитного поля.

Процесс калибровки состоит из четырех этапов:

1. Запись показаний при разных ориентациях
2. Подбор параметров модели
3. Задание зависящих от местности величин ускорения свободного падения, магнитной индукции
4. Программирование калибровочных коэффициентов в прибор

Ориентации для калибровки (34 положения) можно разделить на три группы, следующие друг за другом:

1. *Азимут* = 0° (постоянный), *Отклонитель* = 0° (постоянный), *Зенит* переменный (-120°..120°)

2. *Азимут* = 90° (постоянный), *Зенит* = 90° (постоянный), *Отклонитель* переменный (0°..360°)

3. *Азимут* = 0° (постоянный), *Отклонитель* = 90° (постоянный), *Зенит* переменный (0..360)

В каждой группе одна пара датчиков (акселерометр, магнитометр) устанавливается в положение с максимальной чувствительностью, что позволяет провести ортогонализацию и приведение наблюдаемых систем координат датчиков к системе координат прибора. Две другие пары датчиков проходят широкий диа-

пазон значений, что позволяет определить смещение лимба, масштаб по оси и смещение нуля датчика.

Количество требуемых ориентаций берется с избытком, чтобы нивелировать неравномерность разметки на лимбах или неоднородность магнитного поля.

Определение параметров модели осуществляется в несколько этапов (описано для одной из двух триад датчиков):

1. подбор матрицы перестановок и отражений – для универсальности программы, на случай работы с инклинометром с другим назначением осей;
2. подбор матрицы ортогонализации;
3. подбор масштабов и смещений нуля;
4. «тонкая» оптимизация полученного преобразования, для приближения нормы измеряемого вектора ускорения или магнитной индукции к 1.

Перед записью калибровок в память прибора пользователь вводит величину ускорения свободного падения и магнитной индукции для вывода измерений прибора в общепринятых единицах (g и мкТл).

В результате проведения калибровки получается отчет с указанием расчетных погрешностей.

### Результаты

По результатам экспериментов температурный дрейф масштабного коэффициента для акселерометров удалось снизить с 1% до  $\pm 0,02\%$ , дрейф смещения нуля с  $0,0025\text{ g}$  до  $\pm 0,005\text{ g}$  на диапазоне температур 25..120 °C (рис. 2).

Дрейф масштабного коэффициента магнитометров удалось снизить с 1.5% до  $\pm 0,5\%$ , дрейф смещения нуля с  $0,15\text{ мкТл}$  до  $\pm 0,05\text{ мкТл}$  (рис. 3).

Применение компенсации для каждого из датчиков позволяет снизить дрейф зенита с  $0,2^\circ$  до  $\pm 0,04^\circ$ ; азимута с  $2^\circ$  до  $\pm 0,25^\circ$ ; угла установки отклонителя с  $0,3^\circ$  до  $\pm 0,05^\circ$ ; расчётного модуля ускорения с  $0,0060\text{ g}$  до  $\pm 0,0002\text{ g}$ ; расчётного модуля магнитной индукции с  $0,58\text{ мкТл}$  до  $\pm 0,02\text{ мкТл}$ .

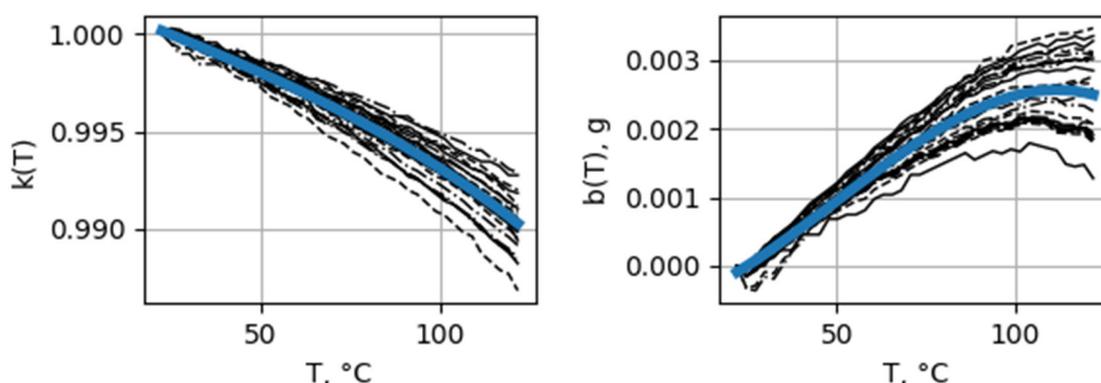


Рис. 2. Характеристики  $k(T)$ ,  $b(T)$  для одного из трех акселерометров. Черными графиками показаны варианты, рассчитанные на основе разных пар записей, со значениями проекций ускорения (g) -0,66, -0,5, -0,27, 0,02, 0,49, 0,26, 0,7. Синий график – результат аппроксимации

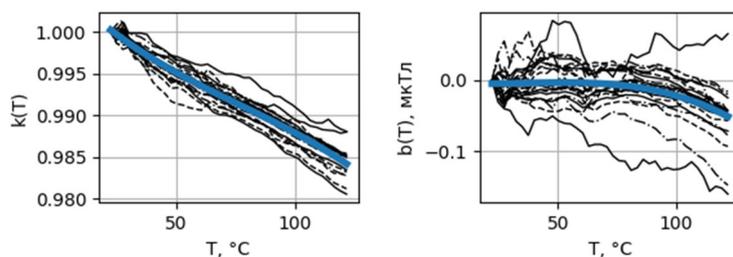


Рис. 3. Характеристики  $k(T)$ ,  $b(T)$  для одного из трех магнитометров. Значения проекции магнитной индукции, для которых проводился расчёт (мкТл): -40, -23, -7, 21, 35, 40. Синий график – результат аппроксимации.

После проведения геометрической калибровки погрешность измерения зенита составила  $\pm 0,01^\circ$ , азимута  $\pm 0,25^\circ$  (при зените  $45^\circ$ ), угла установки отклонителя  $\pm 0,1^\circ$  (при зените  $45^\circ$ ).

Были проведены одновременные полевые испытания двух инклинометров: разработанного в НПП ГА «Луч» (прибор Н) и эксплуатируемого ранее APS-760 (прибор А), смонтированных в два разных модуля памяти и измерения (МПИ), расположенных непосредственно друг над другом. Расстояние между точками записи двух приборов составило 1,9 метра.

Прибор Н работал в режиме регистратора, записывая данные измерений на повышенной частоте 1000 выборок/с (для обеспечения задела на изменение алгоритмов цифровой обработки сигналов).

Прибор А использовался как основной модуль инклинометрии, данные измерений передавались по гидравлическому каналу связи инженерам-телеметристам, также записывались в память с частотой 0,25 выборок/с.

Скважина была пробурена успешно, оба прибора сохранили свою работоспособность на протяжении всего рейса, в ходе которого было наращено 110 буровых труб, инклинометрические замеры для построения траектории проводились через каждые 19 метров. Диапазон глубин вдоль ствола скважины для Прибора А: 1197...3409 м, для Прибора Н: 1199...3411 м.

С применением специализированного ПО метода минимальной кривизны построены две траектории скважины в географической системе координат oNEh (N – смещение на магнитный север, E – смещение на магнитный восток, h – глубина вдоль отвеса), с началом координат в устье. Рассчитано расстояние между траекториями с шагом 19 метров вдоль ствола (Рис. 4). Расстояние между двумя траекториями на глубине 3400 м составило 1,64 м.



Рис. 4. Зависимость расстояния между траекториями прибора А и прибора Н от глубины

## Обсуждение

Величина температурных дрейфов углов ориентации с применением компенсации при зените  $45^\circ$  не превышает заявленную погрешность измерения (по зениту  $\pm 0,04^\circ$ , по азимуту  $\pm 0,25^\circ$ , по углу установки отклонителя  $\pm 0,05^\circ$ ). Геометрическая калибровка в комнатных условиях обеспечивает погрешность измерения зенита  $\pm 0,01^\circ$ , азимута  $\pm 0,25^\circ$  (при зените  $45^\circ$ ), угла установки отклонителя  $\pm 0,1^\circ$  (при зените  $45^\circ$ ).

Суммарная погрешность  $\pm 0,05^\circ$  по зениту,  $\pm 0,5^\circ$  по азимуту (при зените  $45^\circ$ ),  $\pm 0,15^\circ$  по углу установки отклонителя (при зените  $45^\circ$ ) в сравнении с требованиями обеспечивает двойной запас по зениту, полуторный запас по азимуту, полуторный запас по углу установки отклонителя. Данный факт свидетельствует о соответствии характеристик прибора заявленным.

По результатам полевых испытаний, расстояние между двумя траекториями на глубине 3400 м составило 1,64 м, что при используемом радиусе круга допуска 25 м (максимальное расстояние от фактического забоя скважины в конце рейса до проектного) является хорошим результатом.

## Заключение

Разработано программное обеспечение, методика калибровки инклинометра производства НПП ГА «Луч», проведены лабораторные и полевые испытания с положительным результатом. Благодаря переходу на ПО и платы собственного производства, ожидается повышение ремонтпригодности и снижение трудозатрат на модернизацию оборудования.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковшов Г.Н., Коловертнов Г.Ю. Приборы контроля пространственной ориентации скважин при бурении. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2001. - 228 с.
2. Семейство универсальных гироскопических инклинометров УГИ-42 // АО «СКБ ПН» URL: <http://skbnp.ru/ugi-42> (дата обращения: 17.04.2023).
3. Каротажный кабельный магнитометрический инклинометр «Кварц-36.04К» // АО «СКБ ПН» URL: <http://skbnp.ru/quartz-36.04> (дата обращения: 17.04.2023).
4. Model 760 Directional Sensor // Applied Physics Systems URL: [https://appliedphysics.com/wp-content/uploads/2022/06/APS\\_DataSheet\\_Model760\\_vA.pdf](https://appliedphysics.com/wp-content/uploads/2022/06/APS_DataSheet_Model760_vA.pdf) (дата обращения: 17.01.2023).
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018664639. Colibri5 / А.А.Власов, Д.В.Тейтельбаум, А.М.Найденов – Заявка №2018618675. Дата поступления 14 августа 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 20 ноября 2018 г.

© В. С. Литвинов, Д. В. Тейтельбаум, А. А. Власов, 2023