

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ, Л. С. ЭЛИНСОН, В. А. ВАСИЛЬЕВ, Л. К. ЖЕЛЕЗНЯК

КАЛИБРОВКА ГРАВИМЕТРА «ЧЕКАН-АМ» МЕТОДОМ НАКЛОНА

Предложена методика калибровки гравиметра «Чекан-АМ», не требующая применения высокоточного стендового оборудования. Разработано специализированное программное обеспечение, которое позволяет автоматизировать процесс выполнения калибровки и обработки ее результатов. Экспериментальная проверка методики подтвердила возможность ее применения для выполнения периодической поверки гравиметра «Чекан-АМ».

Ключевые слова: гравиметр «Чекан-АМ», метод наклона, калибровка, программное обеспечение

Введение

Разработанный ЦНИИ «Электроприбор» мобильный гравиметр «Чекан-АМ» в настоящее время активно используется отечественными и зарубежными организациями при выполнении морских и авиационных гравиметрических работ в целях поиска нефтегазоносных структур и изучения гравитационного поля Земли [1–9].

Гравиметр «Чекан-АМ» является сертифицированным средством измерений (Свидетельство об утверждении типа средств измерений №43837), у которого интервал времени между поверками составляет 2 года. Основной процедурой, выполняемой при периодической поверке, является определение коэффициентов градуировочной характеристики гравиметрического датчика (ГД), или, иными словами, калибровка его чувствительного элемента. Традиционно калибровка гравиметра выполняется методом наклона, при котором известные приращения ускорения силы тяжести задаются изменением положения измерительной оси ГД относительно местной вертикали [10, 11]. Задание и определение углов наклона производится на высокоточных наклонно-поворотных стендах. Таким образом, выполнение периодической поверки приводит к необходимости демонтажа гравиметра и доставки его на предприятие-изготовитель.

Целью данной работы являлась разработка и внедрение новой технологии калибровки гравиметра непосредственно с использованием его аппаратно-программных средств.

Соколов Александр Вячеславович. Кандидат технических наук, заместитель генерального директора по инновациям АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург). Член секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Краснов Антон Алексеевич. Начальник сектора АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

Элинсон Леон Соломонович. Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО (С.-Петербург).

Васильев Владимир Андреевич. Кандидат физико-математических наук, научный сотрудник АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО.

Железняк Леонид Кириллович. Доктор технических наук, главный научный сотрудник Института физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН (Москва).

Метод наклона

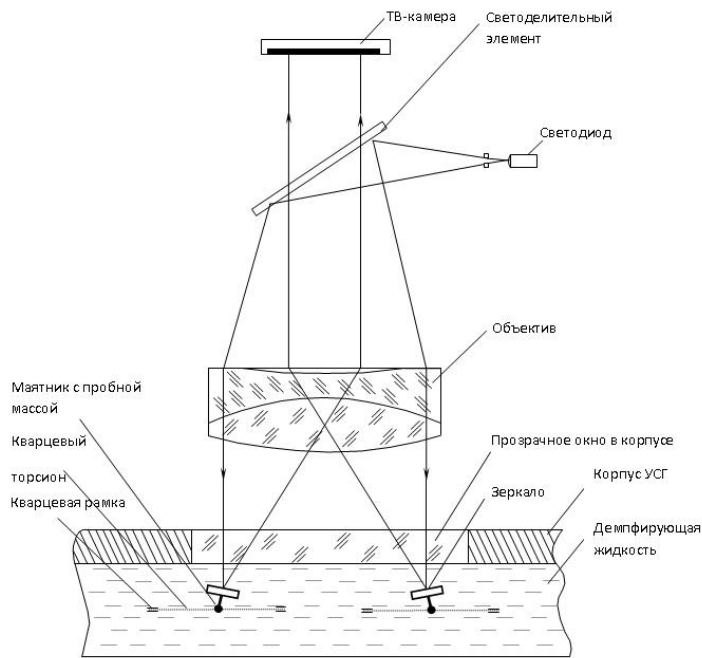


Рис. 1. Схема ГД

фирование маятников. Изменение угла поворота маятника $\Delta\varphi$, рад, характеризует изменение ускорения силы тяжести Δg , мГал.

Для измерения угла $\Delta\varphi$ к маятникам приварены зеркала, плоскости которых параллельны осям маятников и развернуты на небольшой угол в противоположном направлении [12].

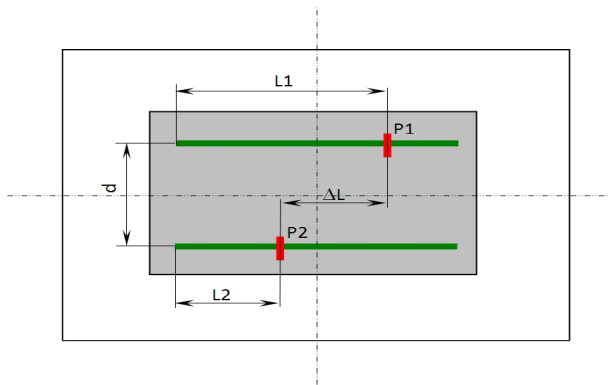


Рис.2. Вид автоколлимационных изображений на ПЗС

Линейное перемещение изображений $L1$, $L2$ пропорционально изменению угла поворота маятников $\Delta\varphi_1$, $\Delta\varphi_2$:

$$L1 = 2nF \Delta\varphi_1, \quad (1)$$

$$L2 = 2nF \Delta\varphi_2, \quad (2)$$

Чувствительный элемент гравиметра «Чекан-АМ» построен на основе двойной кварцевой упругой системы крутильного типа, которая состоит из двух идентичных кварцевых систем, помещенных в корпус (рис. 1).

Кварцевые системы развернуты друг относительно друга на 180° . Каждая система содержит кварцевую рамку с торсионом, к которому приварен маятник с пробной массой. Внутренний объем

испечивающей демпфирование маятников. Измерение угла $\Delta\varphi$ производится посредством оптико-электронного преобразователя (ОЭП) автоколлимационного типа, в котором в качестве приемника излучения установлены два прибора с зарядовой связью (ПЗС) линейного типа [13]. На светочувствительных площадках ПЗС формируются автоколлимационные изображения P1

где n – коэффициент преломления жидкости ($n = 1,4$); F – фокусное расстояние объектива, мм.

На выходе ОЭП вырабатываются отсчеты m_1, m_2 в пикселах, связанные с линейными величинами $L1, L2$ соотношениями:

$$m_1 = L1 / \delta, \quad m_2 = L2 / \delta, \quad (3)$$

где δ – размер пиксела в миллиметрах.

Итоговый коэффициент K преобразования угла поворота маятников φ в отсчеты m определяется выражением

$$K = m / \varphi = 2nF / \delta. \quad (4)$$

Нить торсиона предварительно закручена на угол Φ так, чтобы исходное положение маятника было близко к горизонтальному, при котором

$$\lambda \Phi = g,$$

где λ – жесткость кварцевой системы.

Изменение силы тяжести на величину Δg вызывает поворот маятника на угол φ . Тогда выполняется условие

$$\lambda (\Phi + \varphi) = (g + \Delta g) \cos \varphi. \quad (6)$$

При малых углах φ соотношение между Δg и углом φ имеет вид

$$\Delta g = \lambda \varphi + g \varphi^2 / 2. \quad (7)$$

Это выражение является основным уравнением гравиметра. На практике его представляют в виде

$$\Delta g = bm + am^2, \quad (8)$$

где

$$b = \lambda / K, \quad (9)$$

$$a = g / 2K^2 \quad (10)$$

суть линейный и квадратичный коэффициенты градуировочной характеристики гравиметра.

Коэффициенты b и a имеют разную физическую природу: первый определяется жесткостью упругой системы и параметрами ОЭП, а второй – только параметрами ОЭП, которые идентичны для всех образцов гравиметров.

Параметры ОЭП гравиметра «Чекан-АМ» приняты следующие: $F = 150$ мм, $\delta = 7$ мкм; расчетное значение коэффициента преобразования $K = 60428$. Отсюда расчетные значения коэффициентов:

$$a_0 = 136,9 \text{ нГал} / \text{пикс}^2 \text{ – для одинарной упругой системы,}$$

$$a = 34,23 \text{ нГал} / \text{пикс}^2 \text{ – для двойной упругой системы.}$$

Угол закручивания торсиона $\Phi = 150^\circ$.

Расчетное значение постоянной упругой системы $\lambda = 1,85$ мГал / угл. с.

Следовательно, чувствительность упругой системы составляет

$$\mu = 1 / \lambda = 0,54'' / \text{мГал.}$$

Расчетные значения линейного коэффициента градуировочной характеристики:

$$b_0 = 6,14 \text{ мГал/пикс – для одинарной упругой системы,}$$

$$b = 3,07 \text{ мГал/пикс – для двойной упругой системы.}$$

Фактические значения коэффициентов b и a определяются экспериментальным путем для каждого образца ГД калибровкой методом наклона. На практике

она производится на неподвижном основании с использованием высокоточного наклонно-поворотного стенда.

В [10, 11] было показано, что коэффициенты градуировочной характеристики для упругой системы крутильного типа могут быть определены из основного уравнения гравиметра при его наклоне в произвольном азимуте γ

$$b(m - m_n) + a(m - m_n)^2 + d\theta(m - m_n) + e\theta = \Delta g + \delta g. \quad (11)$$

где

$$d = g \cos \gamma / K, \quad (12)$$

$$e = g(m_n \cos \gamma / K + \varepsilon \sin \gamma), \quad (13)$$

- m_n – отсчет гравиметра в горизонте, пикс;
- m – отсчет гравиметра при наклоне, пикс;
- θ – угол наклона измерительной оси гравиметра;
- γ – поворот в азимуте осей вращения кварцевой системы относительно плоскости наклона стола стенда;
- ε – отклонение от горизонта оси вращения кварцевой системы;
- d, e – коэффициенты, обусловленные ориентировкой гравиметра на столе стенда;
- Δg – задаваемая разность силы тяжести, мГал;
- δg – поправка к задаваемой разности, определяемая начальными установками на столе и углом наклона.

Величина Δg вычисляется в соответствии с выражением

$$\Delta g = g(1 - \cos \theta), \quad (14)$$

где g – значение силы тяжести в месте проведения калибровки.

Решением системы уравнений типа (11) после серии наклонов по методу наименьших квадратов находятся искомые коэффициенты b и a [14]. Так как уравнение (11) учитывает не все влияющие факторы, например провис нитей,

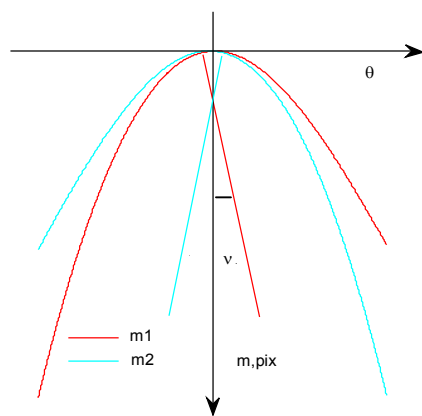


Рис. 3. График зависимости $f(\theta)$ для двух кварцевых упругих систем гравиметра

то выполняется несколько приемов калибровки в различных азимутах. Прибор разворачивается на столе для изменения плоскости наклона. После совместной обработки всех приемов определяются коэффициенты каждой кварцевой системы и коэффициенты прибора. Процедура калибровки является сложной и может выполняться только при наличии специального оборудования и высокой квалификации исполнителей.

Для повышения точности калибровки предварительно выполняются регулировка уровней и выставка прибора в азимут, совпадающий с осью вращения кварцевой системы. Попарно выполняется ряд наклонов стола выше и ниже горизонта. В результате получается зависимость отсчетов m от угла наклона θ

$$m = f(\theta). \quad (15)$$

График этой зависимости, которую принято называть «косинусоидой», приведен на рис. 3.

Вершина косинусоиды определяет нулевое положение уровня, который фиксируется. Угол ν между осью симметрии косинусоиды и осью ординат в зависимости от плоскости наклона стола носит синусоидальный характер. При наклоне стола в плоскости маятников угол ν достигает наибольшего значения, при наклоне в плоскости оси вращения маятников $\nu = 0$.

Плоскость наклона определяется путем нахождения нулевого значения коэффициента

$$K_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{i02} - \varepsilon_{i01}}{\theta_2 - \theta_1}, \quad (16)$$

где ε_{02} , ε_{01} – отклонения оси чувствительности каждой кварцевой системы от вертикали, вычисленные при наклоне гравиметра на углы θ_2 и θ_1 соответственно.

Значения ε_{θ} вычисляются по формуле

$$\varepsilon_{i01} = -\frac{m_{i+} - m_{i-}}{m_{i+} + m_{i-} - 2m_{i_0}} \times \frac{|\theta_1|}{2}, \quad (17)$$

где m_+ , m_- – отсчеты, полученные при наклоне гравиметра на угол θ в положительную и отрицательную стороны соответственно.

Коэффициент K_{ε} характеризует угол ν отклонения оси симметрии косинусоиды от оси ординат. При малых углах $\Delta\gamma$ можно полагать, что зависимость $K_{\varepsilon} = f(\gamma)$ носит линейный характер. Поэтому для определения азимута $\gamma_{\text{эт}}$ плоскости наклона для каждой кварцевой системы достаточно определить значение коэффициента K_{ε} при двух азимутальных углах γ_1 и γ_2 , отстоящих по разные стороны от плоскости $\gamma = 90^\circ$ на некоторый угол $\Delta\gamma$, равный 10° .

Тогда

$$\gamma_{\text{эт}1} = \gamma_1 + \frac{20}{K_{\varepsilon 1} - K_{\varepsilon 2}} \times K_{\varepsilon 1}. \quad (18)$$

За азимут плоскости наклона двойной упругой системы принимается

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{эт}1} + \gamma_{\text{эт}2}}{2}. \quad (19)$$

Данная процедура описывает нахождение плоскости эталонирования с погрешностью не более $1'$.

Погрешность δg появляется вследствие наличия угла 2ε между осями вращения двух упругих систем и погрешности $\Delta\gamma$ азимутальной выставки гравиметра и в первом приближении определяется выражением

$$\delta g = 2g\varepsilon \varphi \Delta\gamma. \quad (20)$$

Угол ε в гравиметре не регулируется и может достигать $10'$. Угол 2φ при изменении силы тяжести на 5 Гал изменяется ориентировочно на $1,5^\circ$. Чтобы погрешность δg не превышала 0,2 мГал, отклонение $\Delta\gamma$ биссектрисы между осями вращения маятников от плоскости наклона гравиметра должно быть менее $20'$, что обеспечивается при изготовлении.

Для нахождения коэффициентов градуировочной характеристики гравиметр последовательно наклоняется на углы $\pm 1^\circ 50'$, $\pm 2^\circ 30'$, $\pm 3^\circ 10'$, $\pm 3^\circ 40'$, $\pm 4^\circ 10'$;

$\pm 4^{\circ}30'$, $\pm 4^{\circ}50'$ и $\pm 5^{\circ}10'00''$. Значения углов наклона выбраны так, чтобы при изменении угла наклона θ значение Δg изменялось приблизительно на 500 мГал.

При соответствующих значениях углов ε , φ , γ , $\Delta\gamma$, не превышающих допусков, и идентичности двух кварцевых систем по чувствительности для калибровки может использоваться укороченное выражение (11)

$$\Delta g = b (m - m_n) + a (m - m_n)^2, \quad (21)$$

причем как для каждой кварцевой системы в отдельности, так и для ГД с двойной упругой системой. В последнем случае отсчет m есть суммарный отсчет.

Из выражения (21) определим коэффициент b

$$b = \Delta g / (m - m_n) - a (m - m_n) = g \theta^2 (m - m_n) / 2 - a (m - m_n). \quad (22)$$

Так как вторая составляющая $a(m - m_n)$ выражения (22) всего 2% от диапазона измерений, то относительная погрешность коэффициента b может быть вычислена дифференцированием первого члена (22)

$$db / b = dg / g + d\theta / \theta + dm / (m - m_n). \quad (23)$$

Полагая, что значение g в пункте калибровки известно с погрешностью $dg < 1$ мГал, первая составляющая (15) не превышает 10^{-4} %. Погрешность измерения $dm < 0,02$ пикс. Наибольшее изменение отсчета m при наклоне на 5 Гал составляет ~ 800 пикс. Отсюда вторая составляющая погрешности не более 0,0025%.

Основное влияние на погрешность определения коэффициента b оказывает погрешность задания угла наклона θ . Для средств испытаний, используемых при калибровке гравиметров, погрешность $d\theta = 3''$. Максимальный угол наклона составляет 5° . Отсюда относительная погрешность $d\theta / \theta \sim 0,02\%$.

Коэффициент a определяется только геометрическими параметрами ОЭП и температурой статирования. Он может быть вычислен по допускам на изготовление оптических элементов с учетом того, что квадратичный член уравнения (21) не превышает 90 мГал на краю диапазона.

В соответствии с (21) показания гравиметра являются квадратичной функцией отсчета. Поэтому коэффициент b градуировочной характеристики относится к начальному отсчету m_n , которое определяется местом и временем калибровки гравиметра.

Наиболее корректно определять масштабный коэффициент при значении m_0 , соответствующем горизонтальному положению маятников упругой системы. Для гравиметра «Чекан-АМ» принято за начало отсчета m_0 считать центр ПЗС-линейки.

Нетрудно показать, что значение b_0 , соответствующее отсчету m_0 , вычисляется по формуле

$$b_0 = b + 2a (m_0 - m_n). \quad (24)$$

Чувствительные элементы гравиметров «Чекан-АМ» имеют жесткие допуски на угловое положение каждой кварцевой системы относительно наружного корпуса. Положение гравиметрического датчика также обеспечивает параллельность оси качки карданового кольца и оси вращения кварцевой системы. Если ГД наклоняется непосредственно вместе с кардановым кольцом в плоскости осей вращения кварцевых систем, то такая система является приемлемой для калибровки ГД непосредственно в составе гироплатформы.

Программно-аппаратные средства

Описанный выше метод наклона используется для всех типов относительных гравиметров в целях калибровки чувствительного элемента. Основным преимуществом новой технологии калибровки является отказ от использования высокоточного наклонно-поворотного стенда. Для наклонов ГД используется двухосная гиropлатформа (ГП), входящая в состав гравиметра (рис. 4).

Конструкция ГП позволяет отказаться от определения азимута наклона, так как погрешность $\Delta\gamma$ установки гравиметрического датчика относительно плоскости наклона карданных колец не превышает $20'$, а погрешность $\delta\theta$ устройств списывания ГП в требуемом диапазоне измерений не превышает $3''$.

Для калибровки гравиметрического датчика в гиropлатформе была разработана специализированная программа Calibr.exe, обеспечивающая как автоматические наклоны гравиметрического датчика на заданные углы через определенные промежутки времени, так и обработку результатов измерений.

В течение всего цикла измерений производится запись файла, содержащего текущие отсчеты гравиметра и углы наклона ГП (рис.5).

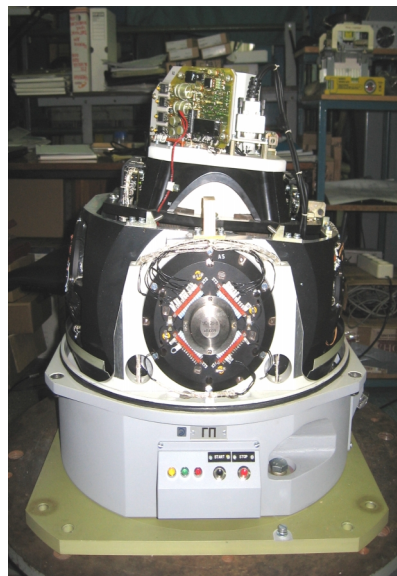


Рис. 4 Калибровка гравиметра с использованием собственного двухосного гиростабилизатора



Рис. 5. Вид экрана программы Calibr.exe в режиме измерений

Длительность измерений при каждом угле наклона платформы 30 мин. Длительность всего периода калибровки 9 ч.

Обработка полученных данных производится способом наименьших квадратов по упрощенной формуле (21) с последующим приведением масштабного коэффициента b к значению b_0 в соответствии с выражением (24).

Для исключения влияния отклонения оси чувствительности гравиметра от вертикали вычисление коэффициента b выполняется по отсчетам

$$m = (m_+ + m_-) / 2, \quad (25)$$

где m_+ , m_- - отсчеты, полученные при наклоне гравиметра на угол θ в положительную и отрицательную стороны соответственно.

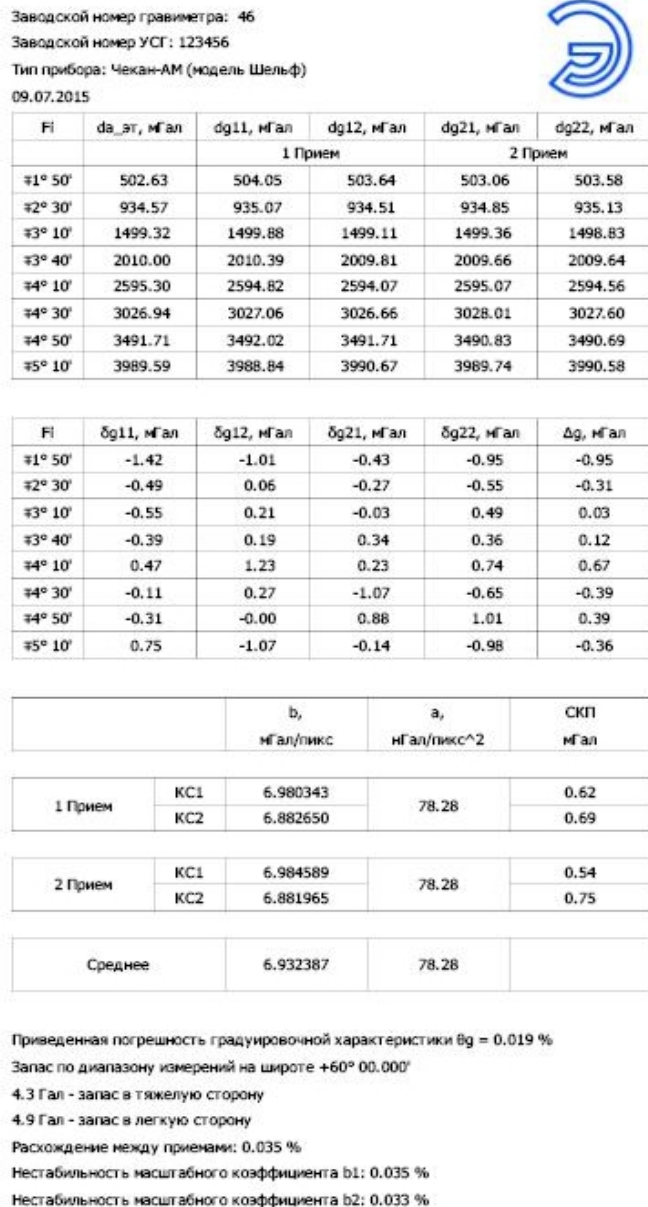


Рис. 6. Протокол калибровки гравиметра, созданный программой Calibr.exe

По окончании работы программы создается файл calibr_XX.pdf, где XX – заводской номер гравиметра «Чекан-АМ». Данный протокол работы программы приведен на рис. 6 и содержит значения следующих параметров:

а) заданные приращения ускорения силы тяжести $da_{эti}$, мГал, и результаты измерений dg_i , мГал, для каждого угла θ_i наклона ГП;

б) отклонения δg_i , мГал, результатов измерений dg_i , мГал, от заданных значений $da_{эti}$, мГал;

в) приведенную погрешность $\theta g, \%$, градуировочной характеристики, за которую принимается отношение максимального (по модулю) из полученных значений δg_i к верхнему пределу диапазона измерений гравиметра $\Delta_0 = 5$ Гал;

г) квадратичный коэффициент a и линейные коэффициенты b_1, b_2 градуировочной характеристики каждой из кварцевых систем гравиметра;

д) отклонения $\delta b_1, \%, \delta b_2, \%$ вычисленных значений b_1, b_2 от исходных значений b_{01}, b_{02} ;

е) запас по диапазону измерений гравиметра.

Созданный программой протокол является необходимым и достаточным документом для оформления Свидетельства о поверке мобильного гравиметра «Чекан-АМ».

Экспериментальные данные

Апробация методики наклона с использованием гиropлатформы была выполнена на семи серийных гравиметрах «Чекан-АМ». Результаты калибровки приведены в таблице.

Заводской номер гравиметра	1-я серия наклонов		2-я серия наклонов	
	Максимальная по величине погрешность δg , мГал	СКО δg , мГал	Максимальная по величине погрешность δg , мГал	СКО δg , мГал
02	-1,34	0,74	-1,03	0,66
06	-1,10	0,63	-1,80	0,82
12	-1,40	0,74	1,20	0,68
26	-1,18	0,67	1,23	0,70
27	-1,57	0,92	-1,62	0,95
31	-1,44	0,95	1,34	0,90
34	-1,33	0,82	-1,35	0,85

На рис. 7 приведено сравнение погрешностей градуировочной характеристики одного и того же гравиметра при выполнении калибровки в ГП и при использовании высокоточного стенда Acutronic.

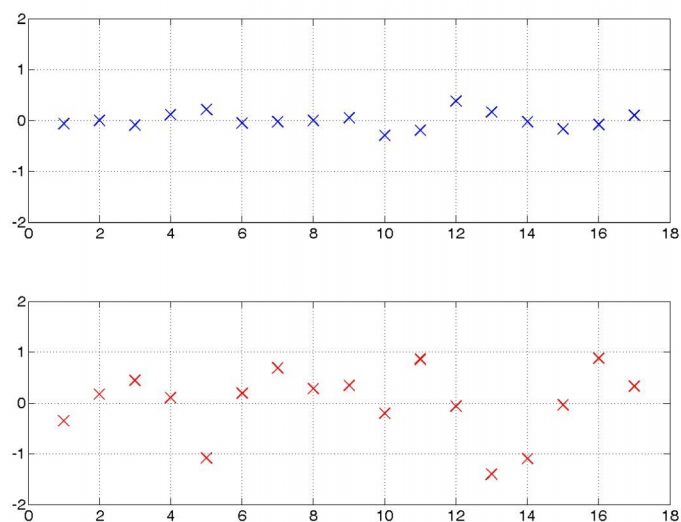


Рис. 7. Результаты калибровки гравиметра «Чекан-АМ» зав. №12 на стенде Acutronic (верхний график) и в составе гиropлатформы (нижний график)

Анализ результатов показывает, что остаточная погрешность калибровки с использованием ГП в среднем в 1,5-2 раза больше, чем с использованием станда Acutronic. Тем не менее предложенная методика позволяет выполнять калибровку гравиметра с требуемой точностью.

Заключение

Предложена и апробирована новая технология калибровки гравиметра «Чекан-АМ» методом наклона с использованием его системы гиросtabilизации и специализированного программного обеспечения, что позволяет проводить периодическую поверку в полевых условиях без применения высокоточного стандового оборудования.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект № 14-29-00160).*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 98-104.
2. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. - 2014. - №1 - С. 26-34.
3. **Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С.** Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Гироскопия и навигация. - 2000. - № 1.- С. 39-50.
4. **Краснов А.А., Соколов А.В.** Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2009. - № 20. - С. 353-357.
5. **Дробышев Н.В., Конешов В.Н., Конешов И.В., Соловьев В.Н.** Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Вестник Пермского университета. - 2011. - № 3. - С. 37-50.
6. **Атаков А.И., Локшин Б.С., Прудников А.Н., Шкатов М.Ю.** Результаты комплексной геофизической съемки на Ушаковско-новоземельской площади Карского моря. Труды международного симпозиума «Наземная, морская и аэрогравиметрия», 2010. С. 33-35.
7. **Лыгин В.А.** Измерения силы тяжести в транзитных зонах с использованием судна на воздушной подушке. Труды международного симпозиума: Наземная, морская и аэрогравиметрия. 2010. С. 47-49.
8. **Forsberg R., Olesen A., Einarsson I.** Airborne Gravimetry for Geoid Determination with Lacoste Romberg and Chekan-AM Gravimeters. Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2013. – С. 10.
9. **Barthelmes F., Petrovic S., Pflug H.** First Experiences with the GFZ New Mobile Gravimeter Chekan-AM. Proceedings of IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements. – СПб.: ЦНИИ «Электронприбор», 2013- С. 18-19.
10. **Железняк Л.К., Элинсон Л.С.** Особенности эталонирования гравиметра с двумя упругими системами крутильного типа методом наклона // Сб. Физико-техническая гравиметрия, М. ИФЗ АН СССР, «Наука», 1982. С. 110-124.
11. **Железняк Л.К., Элинсон Л.С., Боярский Э.А.** Эталонирование наклоном гравиметров с упругой системой крутильного типа // Сб. Гравиметрические исследования, М. ИФЗ АН СССР, «Наука», 1983. С. 144-180.
12. **Евстифеев М.И., Краснов А.А., Соколов А.В., Старосельцева И.М., Элинсон Л.С., Железняк Л.К., Конешов В.Н.** Гравиметрический датчик нового поколения // Измерительная техника. - 2014. - № 9.

13. Березин В.Б., Березин В.В., Соколов А.В., Цыцулин А.К. Адаптивное считывание изображения в астрономической системе на матричном ПЗС // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2004. - №4. – С.36.
14. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 496 с.

Abstract. A method for calibration of the Chekan-AM gravimeter, the one that does not require any bench testing equipment, is proposed. Special software providing for automatic calibration and processing of the calibration results has been developed. The experimental verification of the proposed techniques has confirmed the feasibility of periodic calibration of the Chekan-AM gravimeter by the new method.

Key words: Chekan-AM gravimeter automatic calibration, tilting method

Материал поступил 10.07.2015