

ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИОННОГО НАСОСА НА ПРОБНОЕ ТЕЛО АБСОЛЮТНОГО БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ГРАВИМЕТРА

М. Я. МАРУСИНА, А. А. СИЛАЕВ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: sila3v@gmail.com

Рассматривается влияние градиентов магнитных полей на пробное тело абсолютного баллистического гравиметра АБГ-ВНИИМ-1. На основании протокола измерений магнитного поля в рабочей области и измерений магнитных полей магнитной системы ионного насоса гравиметра созданы модели градиентов и с помощью метода конечных элементов рассчитаны отклонения измеренного ускорения свободного падения от исходного. Разработаны рекомендации по конструкции пробного тела и прибора в целом.

Ключевые слова: абсолютный баллистический гравиметр, вихревые токи, метод конечных элементов, ускорение свободного падения, градиент магнитного поля

Свободное движение пробного тела в гравитационном поле на гравиметрическом пункте на Земле реализуется абсолютным баллистическим гравиметром (АБГ). Ускорение свободного падения g оценивается исходя из уравнения движения пробного тела. Параметры движения (интервалы пути и времени) измеряются с помощью лазерного интерферометра и системы измерения временных интервалов [1—4]. Высокая точность измерения пути и времени крайне важна для работы АБГ. Чтобы относительная погрешность измерения величины g достигала нескольких единиц микрогал (10^{-8} м/с²), погрешность измерения перемещений пробного тела должна составлять 1 нм. Относительная погрешность измерения на малых интервалах времени свободного падения не должна превышать $5 \cdot 10^{-10}$ с [4].

Во Всероссийском научно-исследовательском институте метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ, Санкт-Петербург) разработан и изготовлен абсолютный баллистический гравиметр в рамках создания российского Государственного первичного эталона единицы ускорения [4]. В этом гравиметре используется первичная референтная методика воспроизведения единицы ускорения [5] в гравиметрии: реализация свободного падения пробного тела; измерение интервалов пути и времени во время свободного падения и оценка ускорения свободного падения. Длина пути свободного падения пробного тела составляет примерно 10 см. Измерение величины g производится на высоте 63 см [4].

Пробное тело абсолютного гравиметра представляет собой оптический отражатель, заключенный в корпус из нескольких основных деталей. Общая масса пробного тела составляет 78 г. Трехмерная модель пробного тела представлена на рис. 1.

Одна из поправок, применяемая к результатам измерений ускорения свободного падения гравиметром, обусловлена взаимодействием проводящего пробного тела с градиентом геомагнитного поля и магнитного поля ионного насоса. Был проведен расчет составляющей инструментальной погрешности АБГ, вызванной взаимодействием пробного тела с градиентом магнитного поля ионного насоса.

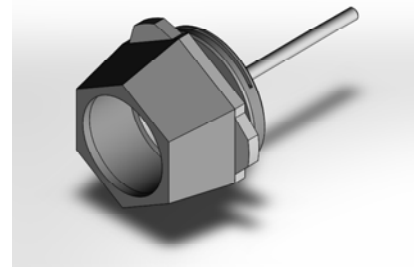


Рис. 1

Для оценки влияния градиента магнитного поля на движение пробного тела использовался протокол измерения поля рассеяния магнитной системы ионного насоса, расположенного на расстоянии 370 мм от пробного тела в верхней точке траектории и 282 мм в нижней: были получены значения 5,6 и 34,1 мТл соответственно (по результатам трехмерного расчета получены значения 3 и 22 мТл соответственно).

Для измерения вертикальной составляющей индукции магнитного поля магнитной системы ионного насоса отдельно от гравиметра был использован тесламетр mT-OLED-16 [6]. Для проведения измерений ионный насос с П-образной магнитной системой был установлен изолированно от остальной конструкции на поверхности лабораторного стола. Отдельно от всех остальных элементов магнитной системы было измерено магнитное поле магнита ионного насоса. Вертикальная составляющая индукции магнитного поля по центру магнита составила 72 мТл на высоте 1 мм от поверхности одного полюса и 62 мТл на высоте 1 мм от поверхности второго полюса.

Схема магнитной системы ионного насоса и положение точек измерения магнитной индукции (вид сбоку) показаны на рис. 2. Следует отметить, что магнитопровод магнитной системы изготовлен при помощи сварки трех отдельных деталей. Максимальная индукция магнитного поля в зазоре магнитной системы (по центру зазора) — 148,4 мТл, на поверхности магнитопровода над магнитом — 4,2 мТл.

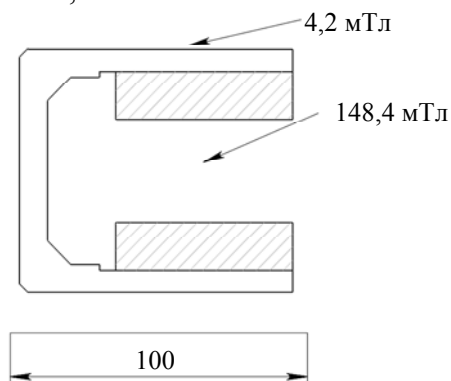


Рис. 2

Расчет магнитных полей проводился на основе программного комплекса Ansys Maxwell. Для создания модели градиента магнитного поля ионного насоса использован трехмерный стационарный расчет, с помощью которого были подобраны материалы магнитопровода и постоянных магнитов [7—11]. Количественная оценка влияния градиента на пробное тело производилась численным методом расчета нестационарных магнитных полей (метод конечных элементов) с учетом влияния вихревых токов. Для этого была создана трехмерная модель пробного тела на основе конструкторской документации (см. рис. 1).

Для моделирования магнитного поля, измеренного вдоль траектории падения пробного тела, был создан соленоид диаметром 100 мм, состоящий из 30 отдельных проводников, для которых методом оптимизации подбиралось наилучшее значение плотности тока [12—14].

Целевая функция S определяется как

$$S = \sum_{i=0}^n \left[B_{z_m}(z_i) - (B_z(z_i) - B_z(z_0)) \right]^2,$$

где $B_z(z)$ — текущее значение вертикальной составляющей магнитной индукции на оси соленоида, $B_{z_m}(z)$ — измеренное значение вертикальной составляющей магнитной индукции на оси падения пробного тела.

После процесса минимизации целевой функции S было воссоздано распределение магнитного поля в осесимметричной модели (рис. 3). Наибольшее отклонение синтезированного поля от измеренного не превышает 2 мкТл.

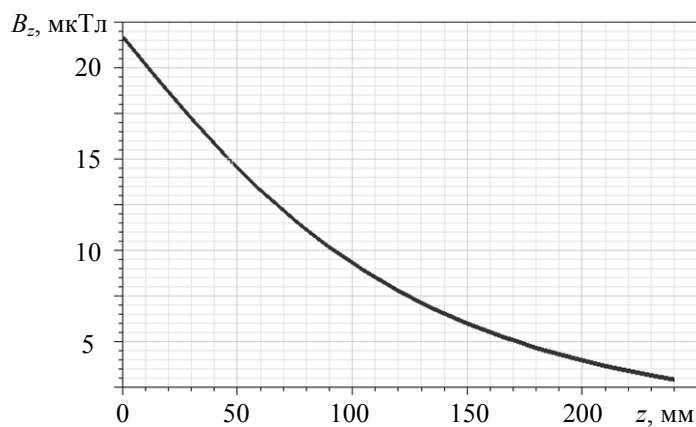


Рис. 3

Расчет показывает влияние магнитного поля на пробное тело при длине падения 100 мм. В результате падения на соленоид и на пробное тело действует сила торможения F_d , которая создает вектор ускорения, направленный в противоположную сторону от направления падения пробного тела. Так, зная величину F_d , можно рассчитать отклонение ускорения E от значения ускорения свободного падения g :

$$E(t) = \frac{F_d(t)}{m},$$

где $F_d(t)$ — сила торможения, возникающая в результате влияния вихревых токов; m — масса пробного тела.

В результате численного моделирования была получена зависимость ошибки измерения ускорения свободного падения пробного тела от времени падения (рис. 4). Максимальное отклонение в 27,3 мкГал показывает необходимость устранения влияния вихревых токов на пробное тело.

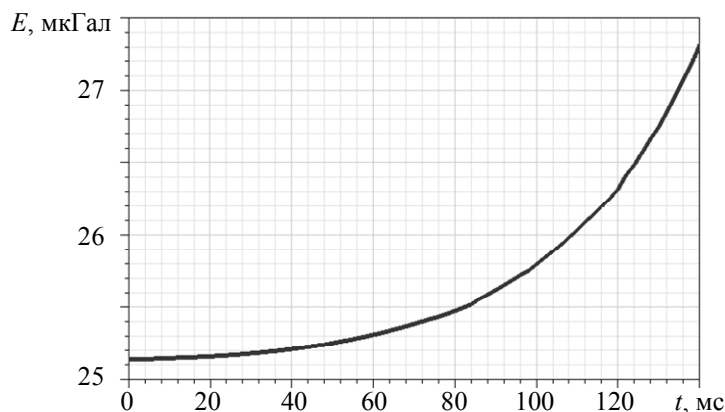


Рис. 4

На основе полученных данных было выработано две стратегии по минимизации влияния магнитных полей на пробное тело:

- 1) создание системы пассивной или пассивно-активной магнитной экранировки рабочей области абсолютного гравиметра;
- 2) создание пробного тела из немагнитных непроводящих материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Niebauer T. M., Sasagawa G. S., Faller J. E. et al. A new generation of absolute gravimeters // Metrologia. 1995. Vol. 32, N 3. P. 159—180.
2. Vitushkin L. Measurement standards in gravimetry // Gyroscopy and navigation. 2011. Vol. 2, N 3. P. 184—191.

3. Vitushkin L. F., Orlov O. A., Germak A., D'Agostino G. Laser displacement interferometers with subnanometer resolution in absolute ballistic gravimeters // *Measurement Techniques*. 2012. Vol. 55, N 3. P. 221—228.
4. Витушкин Л. Ф., Орлов О. А. Абсолютный баллистический гравиметр АБГ-ВНИИМ-1 разработки ВНИИМ имени Д. И. Менделеева // *Гирскопия и навигация*. 2014. № 2(85). С. 95—101.
5. JCJM 200:2012. International Vocabulary of Metrology – Basic and general concepts and associated terms // BIMP [Электронный ресурс]: <http://www.bimp.org/utls/common/documents/jcdm/JCJM_200_2012.pdf>, 18.05.2018.
6. Современный портативный тесламетр // *Магнитопласты и магнитные системы* [Электронный ресурс]: <http://valtar.ru/Magnets4/mag_4_58.htm>, 18.05.2018.
7. Пат. 2054662 РФ. Устройство для создания магнитного поля с поперечным градиентом индукции / П. А. Галайдин, А. И. Замятин, М. Я. Марусина // *Изобретения*. 1996.
8. Галайдин П. А., Иванов В. А., Марусина М. Я. Расчет и проектирование электромагнитных систем магнитрезонансных томографов: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 87 с.
9. Марусина М. Я. Инвариантный анализ и синтез в моделях с симметриями. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 144 с.
10. Flegontov A. V., Marusina M. J. The comparison method of physical quantity dimensionalities // *Lecture Notes in Computer Science*. 2009. Vol. 5743 LNCS. P. 81—88. DOI: 10.1007/978-3-642-04103-7_8.
11. Марусина М. Я. Коррекция неоднородности основного магнитного поля МР-томографа на постоянных магнитах: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПбГУ(ТУ) ИТМО, 1993.
12. Марусина М. Я. Оптимизация измерительных преобразований на основе теоретико-группового анализа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2005. Т. 48, № 3. С. 27—31.
13. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Силаев А. А., Марусин М. П., Закемовская Е. Ю., Гилев А. Г., Алексеев А. В. Магнитная система на основе постоянных магнитов для расходомера многофазных текучих сред // *Измерительная техника*. 2014. № 4. С. 62—65.
14. Марусина М. Я., Базаров Б. А., Галайдин П. А., Силаев А. А., Марусин М. П., Закемовская Е. Ю., Мустафаев Ю. Н. Синтез градиентной системы мультифазного расходомера // *Измерительная техника*. 2014. № 5. С. 68—72.

Сведения об авторах

Мария Яковлевна Марусина

— д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра технологий интроскопии; E-mail: marusina_m@mail.ru

Алексей Алексеевич Силаев

— аспирант; Университет ИТМО, кафедра технологий интроскопии; E-mail: sila3v@gmail.com

Поступила в редакцию
23.05.18 г.

Ссылка для цитирования: Марусина М. Я., Силаев А. А. Влияние градиента магнитного поля ионного насоса на пробное тело абсолютного баллистического гравиметра // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2018. Т. 61, № 8. С. 701—705.

INFLUENCE OF THE GRADIENT OF THE MAGNETIC FIELD OF THE ION PUMP ON THE TRIAL BODY OF ABSOLUTE BALLISTIC GRAVIMETER

M. Ya. Marusina, A. A. Silaev

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: sila3v@gmail.com

Influence of magnetic field gradients on the test body of the absolute ballistic gravimeter ABG-VNIIM-1 is considered. Based on the protocol for measuring the magnetic field in the working region and data on magnetic fields of the pump magnetic system of the gravimeter, gradient models are created. Using the finite elements method, deviation of measured value of free fall acceleration from the initial one is calculated. Recommendations for design of the test body and the whole instrument are formulated.

Keywords: absolute ballistic gravimeter, eddy currents, finite elements method, gravimetry, magnetic field gradient

REFERENCES

1. Niebauer T.M., Sasagawa G.S., Faller J.E. et al. *Metrologia*, 1995, no. 3(32), pp. 159–180.
2. Vitushkin L. *Gyroscopy and navigation*, 2011, no. 3(2), pp. 184–191.
3. Vitushkin L.F., Orlov O.A., Germak A., D'Agostino G. *Measurement Techniques*, 2012, no. 3(55), pp. 221–228.
4. Vitushkin L.F., Orlov O.A. *Gyroscopy and navigation*, 2014, no. 2(85), pp. 95–101. (in Russ.)
5. *International vocabulary of metrology*, Basic and general concepts and associated terms (VIM), JCGM 200:2008.
6. http://valtar.ru/Magnets4/mag_4_58.htm. (in Russ.)
7. Patent RU 2054662 C1, *Ustroystvo dlya sozdaniya magnitnogo polya s poperechnym gradiyentom induktsii* (Device to Generate a Magnetic Field with a Transverse Gradient Induction), P.A. Galaydin, A.I. Zamyatin, M.Ya. Marusina, Published 20.02.1996.
8. Galaydin P.A., Ivanov V.A., Marusina M.Ya. *Raschet i proyektirovaniye elektromagnitnykh sistem magnitorezonansnykh tomografov* (Calculation and Design of Electromagnetic Systems of Magnetic Resonance Tomography), St. Petersburg, 2004, 87 p. (in Russ.)
9. Marusina M.Ya. *Invariantnyy analiz i sintez v modelyakh s simmetriyami* (Invariant Analysis and Synthesis in Models with Symmetries), St. Petersburg, 2004, 144 p. (in Russ.)
10. Flegontov A.V., Marusina M.J. *Lecture Notes in Computer Science*, 2009, no. 5743 LNCS, pp. 81–88. DOI: 10.1007/978-3-642-04103-7_8.
11. Marusina M.Ya. *Korreksiya neodnorodnosti osnovnogo magnitnogo polya mr-tomografa na postoyannyykh magnitakh* (Correction of the Inhomogeneity of the Main Magnetic Field of MRI Scanner with Permanent Magnets), Candidate's Thesis, St. Petersburg, 1993, 128 p. (in Russ.)
12. Marusina M.Ya. *Journal of Instrument Engineering*, 2005, no. 3(48), pp. 27–31. (in Russ.)
13. Marusina M.Ya., Bazarov B.A., Galaydin P.A., Silayev A.A., Marusin M.P., Zakemovskaya E.Yu., Gilev A.G., Alekseyev A.V. *Measurement Techniques*, 2014, no. 4, pp. 62–65. (in Russ.)
14. Marusina M.Ya., Bazarov B.A., Galaydin P.A., Silayev A.A., Marusin M.P., Zakemovskaya E.Yu., Mustafayev Yu.N. *Measurement Techniques*, 2014, no. 5, pp. 68–72. (in Russ.)

Data on authors

- Maria Ya. Marusina** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Introscopy Technologies; E-mail: marusina_m@mail.ru
- Alexey A. Silaev** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Introscopy Technologies; E-mail: sila3v@gmail.com

For citation: Marusina M. Ya., Silaev A. A. Influence of the gradient of the magnetic field of the ion pump on the trial body of absolute ballistic gravimeter. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 8. P. 701–705 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-8-701-705