

## ЛАЗЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ВОСПРИЯТИЯ ИНФОРМАЦИИ

УДК 528.56

Г. П. АРНАУТОВ, Е. Н. КАЛИШ, Ю. Ф. СТУСЬ  
(Новосибирск)

### ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ МЕТОДОМ МНОГИХ СТАНЦИЙ

Предлагается метод учета и устранения влияния сопротивления воздуха и местного градиента силы тяжести при измерении абсолютного значения ускорения силы тяжести по свободному падению тел. Метод основан на использовании результатов измерений многих интервалов пути и времени падения тела для решения уравнения его движения.

При измерении абсолютного значения ускорения силы тяжести влияние сопротивления воздуха уменьшают вакуумированием объема, в котором производят измерение движения падающего тела, до давлений порядка  $10^{-4}$ — $10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup> [1, 2]. В стационарных (лабораторных) установках обеспечение такой степени разрежения не встречает затруднений. Однако в транспортабельных гравиметрах желательно освободиться, по крайней мере, от высоковакуумных агрегатов, увеличивающих габариты и вес установки и требующих затрат электроэнергии, которые в полевых условиях не всегда можно обеспечить. Изготовление гравиметра с опаиваемой вакуумированной трубой не решает полностью проблему. Это связано с трудностями сохранения в трубе высокого вакуума в течение длительного срока, а главное — с нередко возникающей необходимостью вскрытия трубы для замены или отладки элементов, находящихся в вакуумированном объеме. Другой путь — внесение поправки на силу сопротивления — эффективен только в тех случаях, когда величина этой поправки невелика. Это ограничение обусловлено тем, что давление измеряется с погрешностью до десятков процентов. Следовательно, и величина поправки будет определена с такой же погрешностью.

Существенного снижения требований к степени разрежения (почти до 1 Н/м<sup>2</sup>) можно добиться, если использовать симметричный метод измерения с подбрасыванием тела вверх [3] или метод совмещения свободного и несвободного падения тел [4, 5]. Аналогичный эффект дает предлагаемый ниже метод многих отсчетов. Этот метод основан на получении информации о величине силы сопротивления и градиента силы тяжести при измерении дополнительных (по сравнению с методом трех станций) интервалов пути и времени. Для пояснения метода представим зависимость пути, пройденного падающим телом, от времени с учетом вертикального градиента силы тяжести и силы сопротив-

ления в следующем виде [1, 2]:

$$z(t) = H_0 + Vt + \frac{1}{2}gt^2 + \frac{1}{2}U_{zz}\left(H_0 - H + \frac{1}{3}Vt + \frac{1}{12}gt^2\right)t^2 - \frac{\alpha_1}{2}\left(V + \frac{1}{3}gt\right)t^2 - \frac{\alpha_2}{2}\left(V^2 + \frac{1}{6}g^2t^2 + \frac{2}{3}Vgt\right)t^2. \quad (1)$$

Здесь вертикальная ось  $z(t)$  направлена вниз, а ее начало находится на высоте  $H$  от уровня фундамента и совпадает с верхним положением центра масс падающего тела перед отпусканьем;  $g$  — значение ускорения силы тяжести на уровне фундамента;  $H_0$  — путь, пройденный телом с момента его отпускания до момента включения счетчиков интервалов пути и времени;  $V$  — скорость тела при  $t=0$ ;  $U_{zz}$  — абсолютная величина вертикального градиента ускорения силы тяжести в пункте измерения;  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — коэффициенты сопротивления воздуха соответственно при первой и второй степенях скорости падения тела.

Отрезки пути  $S_i = z(t_i) - H_0$ , отсчитываемые от момента  $t=0$  за времена  $t_i$ , равны

$$S_i = Vt_i + \frac{1}{2}gt_i^2 + \frac{1}{2}U_{zz}\left(H_0 - H + \frac{1}{3}Vt_i + \frac{1}{12}gt_i^2\right)t_i^2 - \frac{\alpha_1}{2}\left(V + \frac{1}{3}gt_i\right)t_i^2 - \frac{\alpha_2}{2}\left(V^2 + \frac{1}{6}g^2t_i^2 + \frac{2}{3}Vgt_i\right)t_i^2. \quad (2)$$

При различных  $t_i$  выражение (2) образует систему алгебраических уравнений, нелинейных относительно неизвестных величин  $g$ ,  $V$ ,  $U_{zz}$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .

Возьмем  $i=5$ , т. е. равным числу неизвестных в системе уравнений типа (2). Решение этой системы уравнений будем искать методом последовательных приближений. Примем за первое приближение решение системы двух укороченных уравнений:

$$S_i = V_1t_i + \frac{1}{2}g_1t_i^2 \quad (i = 1, 2), \quad (3)$$

в которых не учитывается влияние силы сопротивления и градиента силы тяжести. Значения  $V_1$  и  $g_1$ , полученные в результате решения этих уравнений, подставим (2) вместо значений, входящих в круглые скобки. Недостающее значение  $H_0$  вычисляется по значению начальной задержки  $t_0$  (см. ниже). Решая полученную таким образом систему уравнений (2), находим второе приближение искомого величин  $g_2$  и  $V_2$ . Эти значения вновь подставляются в круглые скобки уравнений (2) и находится следующее приближение  $g_3$  и  $V_3$ . Если разность между  $g_3$  и  $g_2$  не превосходит заданную погрешность измерения  $g$ , вычисления на этом заканчиваются. В противном случае вычисляется следующее приближение величины  $g$  до тех пор, пока это значение не приблизится к предыдущему на величину, меньшую заданной погрешности измерения. Таким образом, схему вычислений можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} F_{1i}(g_1, V_1) &= 0 & (i=1, 2); \\ F_{1i}(g_2, V_2) &= F_{2i}(g_1, V_1) & (i=1, 2, 3, 4, 5); \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{1i}(g_{n+1}, V_{n+1}) = F_{2i}(g_n, V_n) \quad (i=1, 2, 3, 4, 5).$$

Здесь

$$\begin{aligned} F_{1i} &= S_i - Vt_i - \frac{1}{2}gt_i^2; & F_{2i} &= \frac{1}{2}U_{zz}\left(H_0 - H + \frac{1}{3}Vt_i + \frac{gt_i^2}{12}\right)t_i^2 - \\ & - \frac{\alpha_1}{2}\left(V + \frac{1}{3}gt_i\right)t_i^2 - \frac{\alpha_2}{2}\left(V^2 + \frac{1}{6}g^2t_i^2 + \frac{2}{3}Vgt_i\right)t_i^2. \end{aligned} \quad (5)$$

При определении сходимости рассматриваемого итерационного процесса возьмем любое  $i$ -е уравнение системы (2) и будем предполагать неизвестным только одно значение  $g$ . Тогда, согласно [6], процесс вычисления  $g$  по схеме (4) сходится, если

$$\left| \frac{\partial F_{2i}}{\partial g} \right| = \left| \frac{\alpha_1}{3} t_i + \frac{1}{3} \alpha_2 t_i (gt_i + 2V) - \frac{1}{12} U_{zz} t_i^2 \right| < 1. \quad (6)$$

Для оценки величины левой части неравенства (6) представим уравнения (2) в следующем виде:

$$S_i = V t_i + \frac{g t_i^2}{2} [1 - \delta g (U_{zz}, \alpha_1, \alpha_2)], \quad (7)$$

— относительная погрешность измерения  $g$  без учета силы сопротивления и градиента силы тяжести.

Сравнивая величины, входящие в (6) и (8), видим, что отношение  $F_{2i}(g)/F_{1i}(g)$  не превосходит, по крайней мере, порядка величины  $\delta g$ . В то же время эксперименты показывают, что даже при атмосферном давлении относительная погрешность измерения  $\delta g \ll 1$ . Следовательно, неравенство (6) удовлетворяется и процесс итераций является сходящимся.

Важно отметить, что в результате решения системы уравнений (2) определяется не только ускорение силы тяжести  $g$ , но и его вертикальный градиент  $U_{zz}$ . Это достоинство рассматриваемого метода особенно важно потому, что значение градиента силы тяжести в пункте измерения не всегда бывает известно, а его нормальное значение из-за влияния аномального распределения масс может на десятки процентов отличаться от действительного. Следовательно, использование нормального значения  $U_{zz}$  для привязки измеренного значения  $g$  к уровню фундамента может привести к погрешности до десятых долей миллигала\*. Использование метода многих станций позволяет произвести измерение  $U_{zz}$  и привязку измеренного значения ускорения силы тяжести  $g$  к необходимому уровню с той же точностью, с которой производится измерение  $g$ .

В тех случаях, когда местный градиент силы тяжести определен (например, по результатам измерения  $g$  на разных уровнях), предлагаемую схему измерения можно упростить. Для этого необходимо предварительно вычислить величину

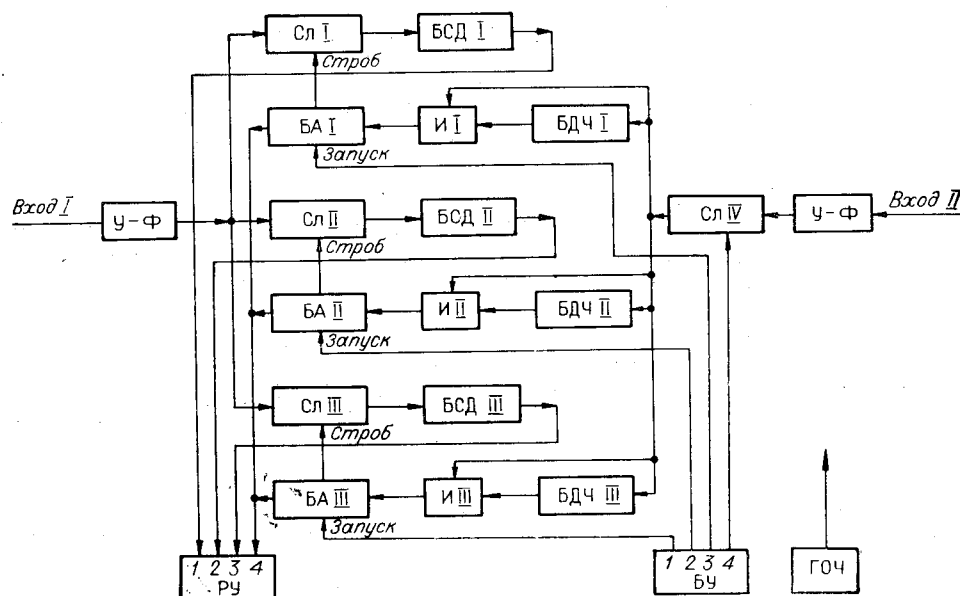
$$\Delta S_i = U_{zz} \left( H_0 - H + \frac{1}{3} V t_i + \frac{1}{12} g t_i^2 \right) t_i^2, \quad (9)$$

а затем внести эту поправку в соответствующие величины измеренного пути  $S_i$  в системе уравнений (2). После вычисления величины (9) число неизвестных в (2) сокращается на одно. Так как влияние градиента силы тяжести проявляется только в седьмом знаке вычисляемого значения ускорения силы тяжести, то при уточнении значения  $g$  до восьми или девяти знаков поправка (9) должна определяться с погрешностью, не превышающей соответственно десять или один процент. Приближен-

\* 1 мгал =  $10^{-5}$  м/с<sup>2</sup>.

ные значения  $H_0$ ,  $V$  и  $g$  могут быть определены простыми расчетами с меньшей погрешностью, чем названная выше. Для вычисления  $V$  и  $g$  используется укороченная система уравнений (3), а  $H_0$  вычисляется по значению начальной задержки  $t_0$ , отсчитываемой от момента отпущения падающего объекта до момента начала отсчета интервалов пути:  $H_0 \approx \frac{1}{2}gt_0^2$ . Влиянием на величину  $H_0$  значения начального импульса при отпуске тела и погрешности измерения  $t_0$ , как показали эксперименты, можно пренебречь с ошибкой, меньшей одного процента.

Изложенная выше методика измерения была использована нами в экспериментах по исключению влияния силы сопротивления, пропорциональной первой степени скорости движения. Измерения проводились противления, пропорциональной второй степени скорости, в системе уравнений (2) остаются три неизвестных величины:  $V$ ,  $\alpha_1$  и  $g$ . Для определения этих величин была построена схема измерения, содержащая три канала счета интервалов пути и времени (см. рисунок). Схема работает следующим образом. Если производится измерение интервалов пути, проходимых падающим телом за заданные интервалы времени, то сигнал с фотоумножителя (ФЭУ) подается на вход I, а метки времени с генератора опорной частоты (ГОЧ) — на вход II. Если измеряется время, за которое тело проходит заданные интервалы пути, то сигнал с ФЭУ подается на вход II, а метки времени — на вход I. На обоих входах сигнал с ФЭУ преобразуется усилителем-формирователем (У-Ф). Каждый канал счета содержит блок счетных декад (БСД), селектор (Сл), блок автоматики (БА), блок делительной частоты (БДЧ) и логическую схему И. Делители частоты совместно со схемой И служат для формирования строб-импульса, т. е. требуемого интервала времени или пути, на протяжении которого осуществляется счет импульсов, поступающих в зависимости от схемы измерения с ФЭУ или с ге-



нератора метод времени. Счетные декады определяют количество импульсов, поступивших на них в течение длительности строб-импульса. Блок автоматики осуществляет сброс счетных декад и декад делителей частоты в исходное состояние, вырабатывает строб-импульс, управляющий селектором, и импульс конца счета — пуска регистрирующего устройства. Результат счета поступает на регистрирующее устройство (РУ). Последовательность операций задается блоком управления (БУ).

Для случая измерения на трех параллельных интервалах, отсчитываемых от одного момента времени  $t=0$ , задавались следующие длительности временных интервалов:  $t_1=0,096$  с,  $t_2=0,16$  с,  $t_3=0,32$  с. При этом сигнал начала счета поступает с блока управления и открывает селектор IV после отпускания отражателя с заданной задержкой  $t_0$ . Первая метка времени проходит через логические схемы И на блоки автоматики и воздействует на триггеры времени счета. Эти триггеры срабатывают и открывают селекторы I, II, III. На счетные декады начинают поступать импульсы с ФЭУ. После того как делители частоты, управляющие схемами И, сформируют заданные интервалы времени  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ , происходит вторичное срабатывание триггеров времени счета и селекторы закрываются. После считывания результатов измерения со счетных декад происходит сброс счетных декад и декад делителей частоты в исходное состояние и цикл измерений может повторяться.

Алгоритм обработки результатов измерения на ЭЦВМ заключается в следующем. Сначала решается система двух укороченных уравнений (3) и определяется первое приближение  $V_1$  и  $g_1$ . По этим значениям и заранее определенным величинам  $U_{zz}$ ,  $H$  и  $H_0$  из выражения (9) находят поправки  $\Delta S_i$  на влияние градиента силы тяжести. Эти поправки вводятся в систему уравнений (2). Далее методом итераций решается система уравнений (2) и определяется исправленное значение ускорения силы тяжести  $g$ .

Из-за воздействия микросейсмических колебаний фундамента, на котором производятся измерения, возникает случайная погрешность единичного измерения ускорения силы тяжести, составляющая около 1 мгал, на фундаменте, установленном в Институте автоматики и электротехники СО АН СССР, и около 0,3 мгал — при измерениях в сейсмическом павильоне Института геологии и геофизики СО АН СССР. Поэтому для повышения точности измерения необходимо накопление и усреднение массива измеренных значений  $g$ . Необходимое число измерений в массиве составляет от 200 до 2500 в зависимости от пункта измерения. На накопление этих массивов требуется от 40 минут до 8 часов непрерывной работы гравиметра. Среднее значение таких массивов, вычисленное с учетом приливных изменений силы тяжести, дает значение ускорения силы тяжести с относительной погрешностью, не превосходящей  $2 \cdot 10^{-8}$ .

Сравнение результатов измерений рассматриваемым методом при разрежении  $0,1$  Н/м<sup>2</sup> с результатами измерений методом трех станций при вакууме  $7 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup> показывает их сходимость в пределах погрешности измерения, равной 0,02 мгал. Сходимость процесса итераций, как и ожидалось, оказалась очень быстрой: при разрежении  $0,1$  Н/м<sup>2</sup> уже второе приближение дает значение ускорения силы тяжести, совпадающее с результатом измерения при вакууме  $7 \cdot 10^{-5}$  Н/м<sup>2</sup>.

В заключение следует отметить, что достоинства метода многих станций не ограничиваются описанными выше возможностями учета влияния сил сопротивления и градиента силы тяжести. С увеличением числа измерений за время одного падения расширяются возможности повышения точности определения ускорения силы тяжести путем обработки различных комбинаций результатов этих измерений. Разнообразными могут быть варианты технической реализации метода многих

станций, однако наиболее перспективными являются одноканальные схемы измерения, в которых осуществляется прямая стыковка электронно-счетного блока с мини-ЭВМ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Г. П. Арнаутов, Л. Д. Гик, Е. Н. Калиш, В. П. Коронкевич, И. С. Малышев, Ю. Е. Нестерихин, Ю. Ф. Стусь, Г. Г. Тарасов. Высокоточный лазерный гравиметр.— «Автометрия», 1972, № 5.
2. Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения. Под ред. чл.-корр. АН СССР Ю. Е. Нестерихина. Новосибирск, Изд. ИАЭ СО АН СССР, 1972.
3. A. Sakuma. Recent developments in the absolute measurement of gravity.— In Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants. Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 343, edited by D. N. Langenberg and B. N. Taylor, p. 447. U. S. Government Printing Office, Washington D. C., 1971.
4. Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ.— «Труды ВНИИМ», 1958, вып. 32 (92).
5. James E. Faller. A new portable absolute gravity instrument.— "Presented at the International Gravity Commission Meeting", 2—7 September, 1974.
6. П. В. Мелентьев. Приближенные вычисления. М., Физматгиз, 1962.

*Поступила в редакцию 17 февраля 1975 г.*

УДК 531.715.1:621.375.826

**С. Я. ДОБРОВА, А. В. ЗОЛотов, Н. Е. ЛЕВАНДОВСКАЯ,  
В. П. МАЙОРОВ, А. К. МОВШЕВ, А. В. ПОПОВА,  
Е. И. ФИНКЕЛЬШТЕЙН, В. И. ХАЛИМОНОВ**

*(Новосибирск)*

### **ПРОМЫШЛЕННЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ФОРУ-1**

В период с 1968 по 1970 г. на Новосибирском приборостроительном заводе им. В. И. Ленина совместно с ИАЭ СО АН СССР была проведена разработка лазерного измерителя перемещений (шифр ФОРУ). В опытных образцах, которые были изготовлены в конце 1970 г., в качестве источника когерентного стабилизированного по частоте излучения использовались ОКГ с системой стабилизации, разработанной НФЗ им. В. И. Ленина, и активными элементами, разработанными и изготовленными ИАЭ СО АН СССР.

В 1973 г. в связи с появлением первых промышленных стабилизированных ОКГ типа ЛГ-32 была проведена доработка и выпущена установочная партия приборов ФОРУ-1.

Интерферометр ФОРУ-1 предназначен для измерения перемещений до 1000 мм путем сравнения с естественной константой — длиной световой волны. Он состоит из двух основных устройств — интерферометра и электронной системы для счета интерференционных полос и обработки результатов измерения. Интерферометр служит для преобразования когерентного излучения ОКГ в периодическую последовательность изменений электрического сигнала, а электронная система — для обработки и вывода результатов измерения на индикаторное и цифropечатающее устройства с учетом предварительного определения длины волны излучения ОКГ. Основные технические характеристики ФОРУ-1: пределы измерения 0÷1000 мм; дискретность отсчета 0,0001 мм; максималь-