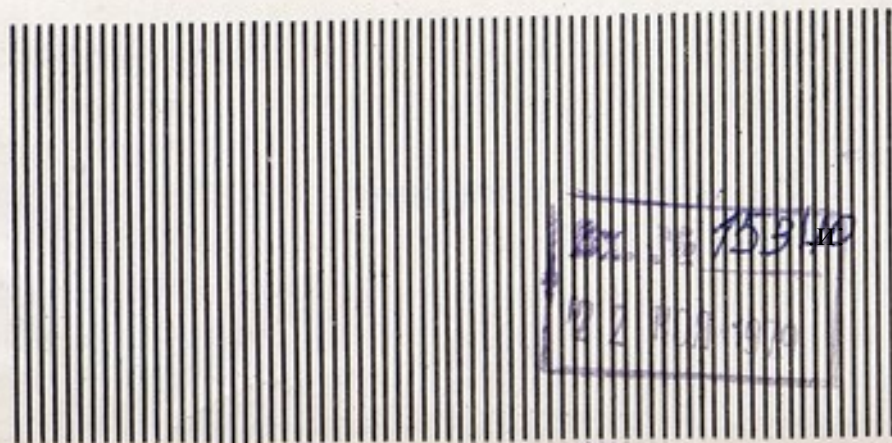


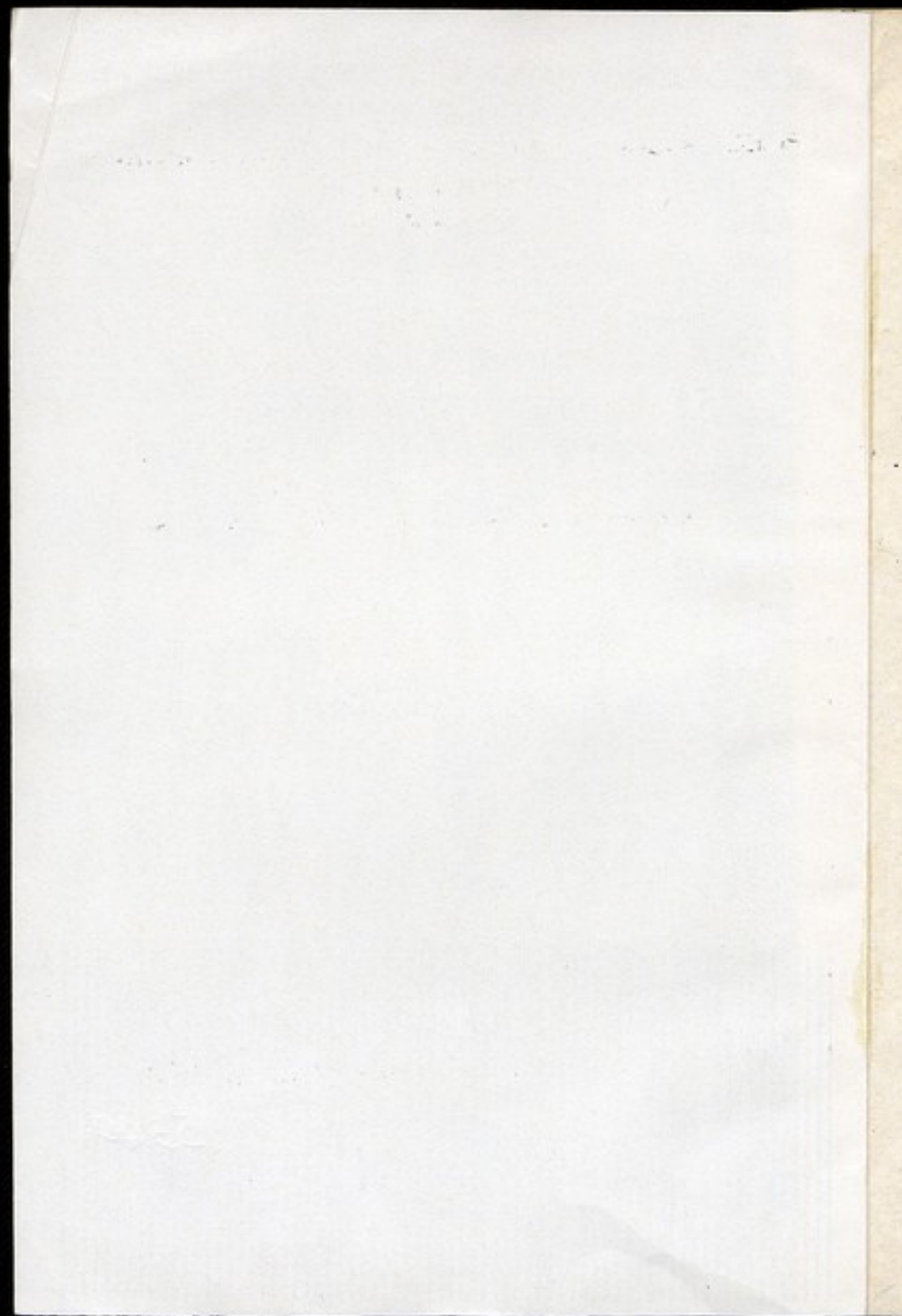
*В. Харенов*  
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

ИЗМЕРЕНИЕ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ  
И ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

ВЫПУСК 227 /287/





ВСЕОБЩЕОТВЕТСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ им. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

---

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ  
СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Труды метрологических институтов СССР

Выпуск 227 (287)

Ленинград - 1977

© Всесоюзный научно-исследовательский институт метро-  
логии им. Д.И. Менделеева

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В статьях сборника изложены основные материалы по теоретическим и экспериментальным исследованиям в определении абсолютного значения ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, проведенным в ХИНИИМ и ГАИШ.

Излагаются сведения по метрологическому анализу основных методов определения достоверной величины ускорения силы тяжести.

Рассмотрены алгоритмы обработки экспериментальных исследований при определении ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной.

Авторы сборника стремились показать основные стороны и направления гравитационных измерений, принципы и способы подхода к решению задачи повышения точности. Все положения теории иллюстрированы примерами.

Статьи сборника могут способствовать решению многочисленных задач при анализе существующих средств гравитационных измерений. Материалы сборника рассчитаны на облегчение работы специалистов в области гравиметрии.

I. ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

В.П.БОНДАРЕНКО, С.С.БОНДАРЬЕВ,  
В.Н.БРЕНЕР, В.Н.ДУДАРЧИК

ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ  
ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для решения ряда задач научного и практического характера необходимо знать ускорение силы тяжести на всей поверхности Земли. Достоверное и точное измерение ускорения силы тяжести связано: с изучением фигуры Земли; наблюдением за вековыми (медленными) изменениями силы тяжести, обусловленными глобальными геодинамическими и геологическими процессами в земной коре и верхней мантии; поисками месторождений полезных ископаемых; обеспечением воспроизведения и правильности передач единиц силы, давления, тока и др.

Необходимо отметить все возрастающий интерес к метрологической обеспеченности гравиметрии. Существует насущная потребность превратить высокоточные измерения в гравиметрии из сложного научного эксперимента в стройную систему измерений, внедрить поверочную схему в области измерения ускорения силы тяжести, обеспеченную соответствующими эталонными и образцовыми средствами. Широкий класс задач, стоящих перед гравиметрией в настоящее время, обеспечивается обширным парком гравиметрических приборов. В первую очередь это относительно новые гравиметры и маятниковые приборы, обеспечивающие измере-

ние приращений ускорения силы тяжести. Однако никакие приборы для относительных определений не могут дать достаточно полную информацию об изменениях силы тяжести.

В последнее время разработаны или разрабатываются приборы для абсолютных измерений силы тяжести — баллистические гравиметры, которые позволят в корне пересмотреть методику проведения гравиметрических работ. К сожалению, весь этот парк гравиметрических приборов, используемых в стране, не обеспечен метрологически и не поверяется органами Госстандарта, что, естественно, сказывается на качестве выпускаемых приборов и достоверности получаемых результатов.

Для метрологического обеспечения единства как абсолютных, так и относительных измерений ускорения силы тяжести необходимо разработать и внедрить общесоюзную поверочную схему, которая должна включать в себя методы и средства воспроизведения и передачи единиц измерения от государственного эталона к образцовым и рабочим средствам измерений. Отечественный и зарубежный опыт исследования и эксплуатации высокоточных абсолютных баллистических гравиметров позволяет считать, что приборы этого типа помогают решать в соответствии с современными требованиями задачу обеспечения поверочной схемы эталонными и образцовыми средствами.

Во главе поверочной схемы должен стоять Государственный специальный эталон единицы ускорения ( $m/s^2$ ) в области измерения ускорения силы тяжести, воспроизводящий абсолютное значение ускорения силы тяжести с погрешностью, не превышающей  $(4+6 \cdot 10^{-9})$  в месте установки, которое будет исходным пунктом опорной сети страны. Далее в поверочной схеме следует эталон

сравнения для сличения Государственного эталона с рабочими эталонами. Погрешность воспроизведения ускорения силы тяжести эталоном сравнения не должна превышать  $6+8 \cdot 10^{-9}$ , а рабочих эталонов —  $8+10 \cdot 10^{-9}$ . Количество рабочих эталонов, равномерно размещенных по территории страны в метрологических учреждениях и заинтересованных ведомствах, должно составлять 10–15 шт.

Рабочие эталоны создают сеть фундаментальных опорных пунктов. Кроме своего метрологического назначения рабочие эталоны могут быть использованы для широкого изучения не-прямых изменений ускорения силы тяжести. Ниже, в поверочной схеме, следуют образцовые абсолютные баллистические гравиметры с погрешностью измерения ускорения силы тяжести, не превосходящей  $1+3 \cdot 10^{-8}$ . Гравиметры этого класса образуют сеть опорных пунктов I-го класса. Внедрение баллистических гравиметров с погрешностью измерения  $1+3 \cdot 10^{-8}$  даст возможность повысить точность определения и передачу целого ряда единиц, связанных с понятием силы. Места установки образцовых гравиметров I-го класса позволят на этом уровне привязать поверочную схему для измерения разности ускорения силы тяжести, используя абсолютные пункты I-го класса как исходные для аттестации образцовых относительных приборов.

В метрологической практике имеется положительный опыт создания временной локальной поверочной схемы для относительных гравиметрических приборов. Эта поверочная схема мингео СССР (срок действия которой с 1.07.1975 по 1.07.1978 г.), может послужить основой для разработки системы метрологического обеспечения относительных гравиметрических приборов в будущем.



Далее следуют гравиметры, погрешность измерения которых не превышает  $5 \cdot 10^{-5}$ . Эти приборы должны использоваться как средства измерения высшей точности и для поверки рабочих гравиметров, замыкающих поверочную схему. Метод поверки во всех случаях - непосредственное сличение. Внедрение общесоюзной поверочной схемы с использованием баллистических гравиметров для абсолютных определений ускорения силы тяжести позволит в будущем проводить гравиметрические измерения как автономные, т.е. отказаться в повседневной практике от развития и поддержания всех классов гравиметрических сетей, что сулит большие выгоды как экономического, так и методологического характера.

В.В.БЕЗРОДНИИ, В.Н.ДУДАРЧИК, В.Д.КРАСОВСКИИ,  
И.Г.ЛЮМИЧЕВА, А.К.СУРКОВ

СТАЦИОНАРНАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИИ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Установка предназначена для проведения регулярных измерений в пункте "Харьков". Принят несимметричный способ - свободное падение пробного тела. Для устранения влияния остаточного давления воздуха в камере (рис.1) предусмотрена возможность использования совмещенного свободного падения тела - зеркала интерферометра майкельсона 1 и защитной камеры 2. В баллистическом блоке реализуется свободное падение пробного тела с отражателем 1. Интерференционная картина трансформируется фотоэлектрическим преобразователем 3 в электрический сигнал, поступающий в электронно-счетный блок.

Ускорение силы тяжести определяется по формуле  $g = \frac{\lambda}{t_1 t_2} \left( \frac{n_2}{t_2} - \frac{n_1}{t_1} \right)$  (где  $\lambda$  - длина

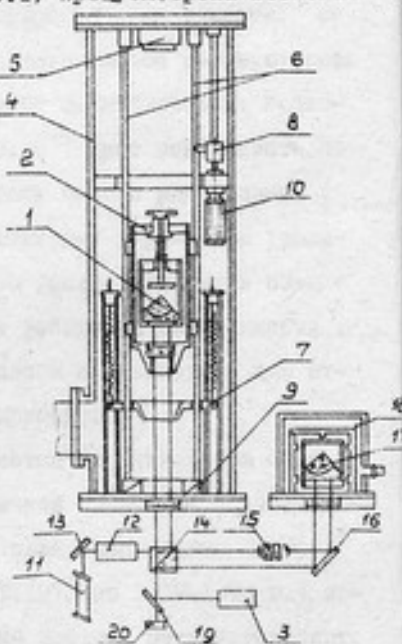


Рис.1. Оптико-механическая схема установки

волны ОКГ;  $t_1, t_2$  - время пролета первого и второго отрезков пути;  $n_1, n_2$  - количество полуволн ОКГ, укладывающихся на первом и втором отрезках пути).

Электронно-счетный блок построен таким образом, что можно либо измерять  $t_1, t_2$ , а задавать  $n_1, n_2$ , либо измерять  $n_1, n_2$ , а задавать  $t_1, t_2$ . Результаты индицируются в цифровом виде и передаются в регистрирующее устройство.

Баллистический блок конструктивно выполнен в виде жесткого каркаса, помещенного в вакуумную камеру 4. На каркасе крепятся все функциональные узлы. В состав блока входят следующие устройства: электромагнитного удержания тела в точке подвеса 5; сведения и разведения направляющих 6, захватывающих тело после окончания измерения и определяющих его положение до момента подвеса; торможения тела и подбрасывания его на некоторую высоту 7; плавного подъема 8 тела в исходное положение. В блоке установлены концевые выключатели, вырабатывающие сигналы, поступающие в систему управления, откуда в программном или ручном режимах работы установки происходит управление электромагнитом сведения и разведения 9 направляющих 6, подвеса 5, и двигателем плавного подъема 10.

Оптический канал установки состоит из двухлучевого интерферометра, подвижное плечо которого - отражатель свободно падающего тела 1, ОКГ ЛГ-32 в качестве источника света 11 и выходного фотоприемника 3. Телескопическая система 12 коллимирует лазерный пучок и расширяет его приблизительно в 15 раз. Установочное зеркало 13 позволяет совмещать ось пучка ОКГ с осью телескопа. Делительный кубик 14 разделяет падающий на него пучок на два идентичных пучка. Один из них, опорный, с помощью опти-

ческого клина 15 и поворотного зеркала 16 направляется на уголкоый отражатель 17 референтного плеча интерферометра, который расположен на системе с большим периодом колебаний 18. Другой пучок, измерительный, предварительно настроенный на вертикальность с ошибкой не хуже  $10''$ , направляется на уголкоый отражатель свободно падающего тела 1. Опорный и измерительный пучки образуют в плоскости делительного кубика интерференционное поле, которое проектируется поворотным зеркалом 19 либо на матовый экран 20 для визуального наблюдения, либо на фотоприемник.

Структурная схема электронно-счетного блока в режиме измерения времени при заданных отрезках пути представлена на рис.2. Сигнал отпуска тела из системы управления запускает цифровой счетчик с предварительным набором устройства задержки 1.

По достижении заданного числа периодов частоты кварцевого генератора устройство задержки генерирует стартовый импульс для счетчика блока отрезков пути 2, на

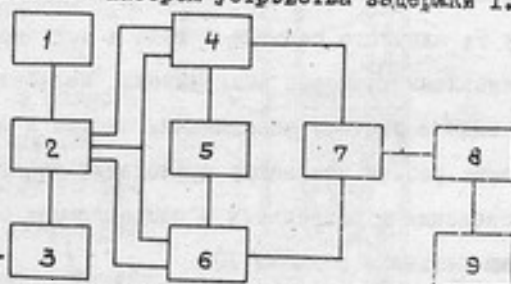


Рис.2. Блок-схема электронно-счетного блока

входа которого после усилителя 3 подается сигнал с фотоэлектрического преобразователя. Блок 2 формирует импульс, запускающий измеритель 4 времени пролета первого отрезка пути, затем импульс, останавливающий счет этого блока и запускающий аналогичный измеритель 6 времени пролета второго отрезка, и третий, останавливающий блок 6. Для повышения быстродействия при генерировании указанных

команд применяется конъюнкция импульсов, сформированных из исходного сигнала. В качестве опорного генератора используется рубидиевый стандарт частоты 5. Согласующий преобразователь 7 трансформирует амплитуду и полярность кодированной информации с измерителей времени в амплитуду и полярность, необходимые для работы транскриптора 8, управляющего цифрорпечатающей машиной 9. Для измерения отрезков пути при заданных интервалах времени достаточно лишь подать стандартную частоту на вход блока 2, а вместо нее на блоки 4 и 6 - сигнал с усилителя 3.

Результаты измерений обрабатываются на ЭКВМ с программным управлением "Искра-123". Предусмотрено подключение перфоратора для последующей обработки на ЭВМ типа "Наири".

Б.Н.ПЕВЗNER, В.А. РОМАНК

### ВЫСОКОТОЧНЫЙ АБСОЛЮТНЫЙ ГРАВИМЕТР

В течение 1967-1975 годов в Институте физики Земли им. О.Д.Шмидта АН СССР был разработан и изготовлен макет высокоточного абсолютного гравиметра (условное обозначение прибора - ЦСТ), который с начала 1976 года и по настоящее время проходит стадию доводки и пуско-наладочных работ в ЦНИИГАиКе.

При разработке гравиметра были проведены теоретические исследования возможных источников ошибок [1]. Принципиальная схема прибора выбрана так, чтобы различными путями исключить или уменьшить их влияние на результаты измерений. В гравиметре реализован баллистический симметричный метод одной станции, позволяющий значительно уменьшить целый ряд погрешностей измерения, присущих несимметричному методу. Большое внимание при разработке гравиметра обращено на выбор оптимального варианта его компоновки.

Гравиметр (рис.1) состоит из следующих частей: катапульти 1, лазерного интерферометра 2, сейсмометра 3 и электронного устройства 4 измерения пути и времени. Для управления работой катапульти служит пульт автоматики 5. С помощью трубопровода 6 катапульта подсоединена к откачному вакуумному по-

сту 7. Оптическая схема связывает между собой блоки 1, 2 и 3. На выходе лазерного интерферометра расположен фотоэлектронный умножитель, который подсоединен к электронному устройству 4.

Интерферометр 2 и сейсмометр 3 установлены на массивном бетонном фундаменте 8, а катапульта 1 закреплена на своем штативе 9, который опирается на фундамент 10, механически развязанный относительно фундамента 8, что в значительной степени снижает

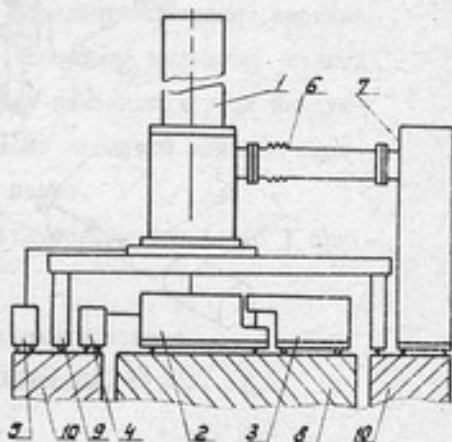


Рис.1. Общая схема компоновки гравиметра

воздействие механических возмущений, возникающих при работе механизмов катапульты, на результаты измерений абсолютного ускорения силы тяжести. Для ослабления влияния микросейсм, а также дальнейшего ослабления влияния работы механизмов катапульты, референтный светоотражатель закреплен на маятнике сейсмометра, причем оптический центр светоотражателя совмещен с центром качания маятника [ 7; 11 ].

В основу оптической схемы прибора (рис.2) положена модифицированная схема интерферометра Майкельсона, подвижный отражатель которой является пробным телом баллистического гравиметра [ 3 ]. Вертикальность луча, направляемого на подвижный светоотражатель, осуществляется с помощью автоколлиматора 12, ртутного зеркала 13, полупрозрачного зеркала 8 (коэффициент

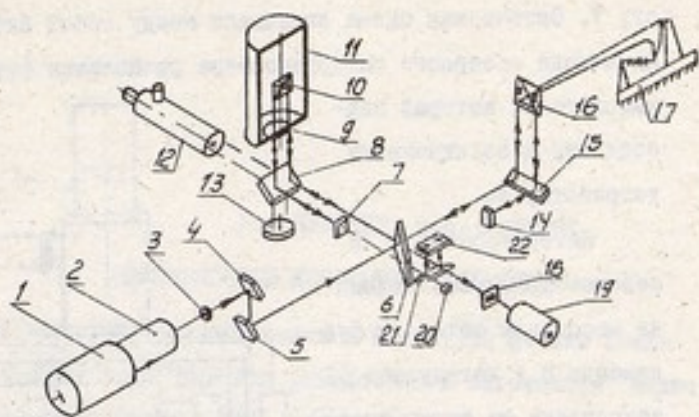


Рис.2. Оптическая схема гравиметра

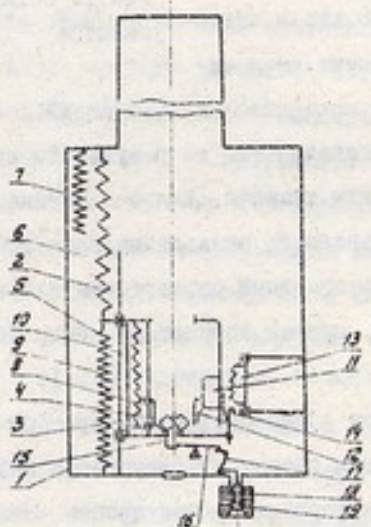


Рис.3. Принципиальная схема катапульты гравиметра



пропускания  $\sim 1\%$ ), полупрозрачного зеркала 7 и зеркала 5. Зеркала 5 и 7 имеют механизм тонкой подвижки, необходимые для задания вертикального направления ходу лучей на участке между зеркалом 8 и светоотражателем 10. Интерференционная картина регулируется с помощью зеркала 14, имеющего механизм тонкой подвижки. Поворотом зеркала 14 может изменяться угол воздушного клина между зеркалами 14 и 7, от которого зависит ширина и ориентация интерференционных полос.

Принципиальная схема катапульты гравиметра [ 5,6 ] приведена на рис.3.

#### Основные технические характеристики

высота подбрасывания светоотражателя, м . . . . .	1,2
длина разгона каретки, м . . . . .	0,3
тормозной путь каретки, м . . . . .	0,2
тормозной путь падающего тела с ловителем, м . . . . .	0,13

Вычисляется  $g$  по следующей приведенной в упрощенном виде формуле:

$$g = \frac{4L}{T^2} = \frac{4n \frac{\lambda}{k}}{\left(k \cdot \frac{T}{f}\right)^2} = \frac{nf^2 \lambda}{k^2},$$

где  $L$  - суммарная длина траектории подвижного светоотражателя при его движении вверх и вниз;  $T$  - время движения подвижного светоотражателя на пути  $L$ ;  $\lambda$  - длина волны лазера;  $n$  - число зарегистрированных интерференционных полос на пути  $L$ ;  $f$  - частота импульсов, заполняющих измеренный отрезок времени;  $k$  - число импульсов, заполняющих временной интервал  $T$ .

Для повышения точности единичного измерения  $g$  предусмотрено измерение дробной части интерференционной полосы в

вершине траектория движения пробного тела [ 4 ]. Принципы - альные решения, положенные в основу гравиметра, а также его технические данные должны обеспечить высокую точность работы. Предполагается, что при относительной стабильности длины волны лазерного излучения, равной  $1 \cdot 10^{-8}$ , погрешность единичного измерения не превысит  $2 \cdot 10^{-8} g$ . Габаритные размеры гравиметра (вместе с сейсмометром) -  $1,6 \times 1,3 \times 2,3$  м.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.А.Романик. Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести. ИФЗ АН СССР, геод. Geoph. Veröff., R.III, N.30, Берлин, 1974.

2. В.А.Романик, Б.Н.Певзнер, Б.Н.Науменко. Способ изготовления подвижного центральносимметричного отражающего тела. Авт. свид. № 274410. "Бюл. изобр.", № 21, 1970.

3. Б.Н.Певзнер, В.А.Романик. Устройство для абсолютных измерений ускорения силы тяжести. Авт. свид. № 329496, "Бюл. изобр.", № 7, 1972.

4. В.А.Романик, М.А.Зайончковский, Б.Н.Науменко. Устройство для абсолютного измерения значения ускорения силы тяжести. Авт. свид. № 333520, "Бюл. изобр.", № 11, 1972.

5. Б.Н.Певзнер. Катапульта для подбрасывания светоотражателя. Авт. свид. № 529439, "Бюл. изобр.", № 36, 1976.

6. Б.Н.Певзнер. Устройство для абсолютных измерений ускорения силы тяжести. Авт. свид. № 545950, "Бюл. изобр.", № 5, 1977.

7. J.A.Hammond, J.E.Palier. Results of Absolute Gravity Determinations at a Number of Different Sites. Journal of Geophysical Research. v.76, N 32, 1971.

В.В.АРБЕНИН, В.Н.БРЕНЕР,  
Ю.Д.БРОДСКИЙ

СИММЕТРИЧНЫЙ МЕТОД АБСОЛЮТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКГ

Среди многообразия баллистических методов особенно стоит выделить симметричные, обладающие рядом существенных преимуществ. Все эти методы объединяются тем, что с их помощью измеряются параметры движения тела, свободно движущегося в поле силы тяжести Земли, симметрично на восходящей и нисходящей ветвях траектории.

Рассмотрим свободное движение тела, подброшенного вверх в поле силы тяжести Земли, с учетом вертикального градиента ускорения силы тяжести и сил сопротивления, пропорциональных первой степени скорости, обусловленных в основном сопротивлением среды, в которой реализуется движение тела. Дифференциальное уравнение такого процесса запишется в виде

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} - \alpha x = -g_0, \quad (I)$$

где  $x$  - высота подъема тела;  $t$  - текущее время;  $\alpha$  - вертикальный градиент ускорения силы тяжести;  $\gamma$  - коэффициент пропорциональности, описывающий зависимость сил сопротивления от скорости движения тела;  $g_0$  - ускорение силы тяжести на нулевом уровне.

Решение уравнения (1) при начальных условиях

$$x_{t=0} = 0; \quad \left(\frac{dx}{dt}\right)_{t=t_0} = 0$$

(где  $t_0$  - момент прохождения телом вершины траектории) приводят к выражению

$$x = g_0 \left[ \left( t t_0 - \frac{t^2}{2} \right) - \gamma \left( \frac{t t_0^2}{2} + \frac{t^2 t_0}{2} - \frac{t^3}{6} \right) + \alpha \left( \frac{t t_0^3}{3} + \frac{t^4}{24} - \frac{t^2 t_0}{6} \right) \right]. \quad (2)$$

Выражение (2) позволяет определить ускорение силы тяжести через путь и время движения тела.

Определим пути, пройденные телом за время  $t_0$ , при движении вверх и вниз. Очевидно  $h_1 = g_0 \left( \frac{t_0^2}{2} - \frac{5}{6} \gamma t_0^3 + \frac{5\alpha}{24} t_0^4 \right)$ ,

$$\text{и } h_2 = g_0 \left( \frac{t_0^2}{2} + \frac{5}{6} \gamma t_0^3 + \frac{5}{24} \alpha t_0^4 \right)$$

Таким образом, общий путь, пройденный телом за время  $2t_0$

$$H = h_1 + h_2 = g_0 \left( t_0^2 - \frac{5}{12} \alpha t_0^4 \right), \quad (3)$$

не зависит при такой постановке эксперимента от  $\gamma$ . Реализация способа определения ускорения силы тяжести с использованием симметричных участков траектории при движении тела вверх и вниз может быть осуществлена несколькими способами. Например, на траектории движения тела задаются равные и симметричные относительно вершины участки пути и измеряется полное время прохождения этих участков. В этом случае выражение (3) имеет вид

$$8h = g_0 \left( T^2 + \frac{5}{48} \alpha T^4 \right),$$

откуда

$$g_0 = \frac{8h}{T^2} \left( 1 - \frac{5}{48} \alpha T^2 \right), \quad (4)$$

где  $h$  - высота подъема тела;  $T$  - полное время между моментами прохождения телом нулевого уровня.

Чтобы зафиксировать равные и симметричные относительно вершины участки траектории, в интерферометре предусматривается два выхода, сигналы в которых сдвинуты по фазе относительно друг друга на  $\frac{\pi}{2}$ .

Таким образом, при движении тела вверх счетчик пути фиксирует число интерференционных полос до тех пор, пока изменения направления движения тела не происходит скачок сдвига фаз, который является командой для остановки вышеупомянутого счетчика пути и запуска второго счетчика пути, который фиксирует интерференционные полосы при движении тела вниз до тех пор, пока их число не станет равным числу интерференционных полос, зафиксированных первым счетчиком пути. Одновременно фиксируется интервал времени между моментами пуска первого и остановки второго счетчиков. При такой схеме проведения измерений в вершине траектории возникает неопределенность в измерении пути порядка  $\frac{\lambda}{2}$ , что может внести известную погрешность в определение ускорения силы тяжести. Для введения поправки на неопределенность в вершине траектории достаточно измерить интервал времени между последним импульсом интерференционного сигнала при движении вниз. В этом случае

$$g_0 = \frac{8H}{T^2} \left( 1 - \frac{T^2}{T^2} - \frac{5}{48} \Delta T^2 \right).$$

Оценим погрешности измерения ускорения силы тяжести этим способом. Погрешность за измерение пути будет составлять  $\left(\frac{\Delta g}{g}\right)_h = \frac{\Delta h}{h}$  для высоты подъема тела в 50 см и погрешности в определении пути 0,01. Эта величина не будет превышать в относительном выражении  $1,2 \cdot 10^{-8}$ . Погрешность за измерение времени определяется выражением  $\left(\frac{\Delta g}{g}\right)_T = \frac{2\Delta T}{T}$  для той же

высоты полета тела и  $\Delta T \sim 10^{-8}$  с (что позволяют реализовать современные электронные счетчики) не будет превышать  $3 \cdot 10^{-8}$ . Таким образом, суммарная погрешность измерений не будет превышать  $\sim 3,2 \cdot 10^{-8}$  в относительном выражении.

По предложенному методу в в отделе гравиметрии ХИНИИ разработана установка для абсолютного определения ускорения силы тяжести. С помощью катапульты подбрасывается зеркало интерферометра 2, выполненное в виде углового отражателя

(рис. 1). При движении отражателя на выходах интерферометра наблюдается интерференционная картина, освещенность которой в точке наблюдения однозначно связана с пространственным положением отражателя. Частота следования интерференционных полос соответствует скорости движения тела. Оптическая схема интерферометра построена так, что фазы сигналов на выходах фотоэлектронных умножителей 4 и 5 отличаются на  $\pi/2$ . При движении тела вверх фазовый детектор 6 вырабатывает сигнал, по которому фазовый ключ 7 включает счетчик импульсов, соответствующих пути, пройденному телом в интерференционных полосах. Первый импульс, по-

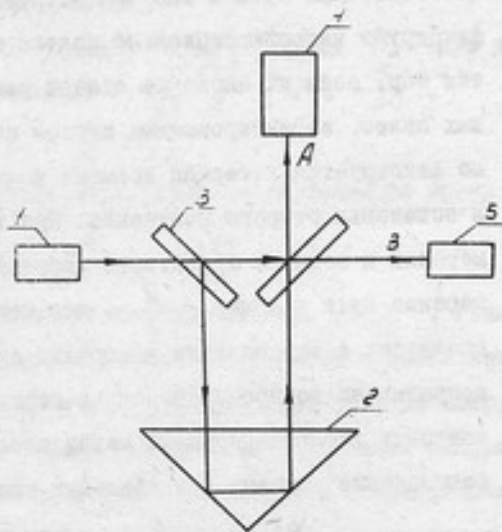


Рис. 1. Интерферометр

20

отупивший на счетчик 8, включает схему измерения времени 11 (рис.2). Когда отражатель I достигает верхней точки траектории, сдвиг фаз между сигналами на выходах ФФУ меняет знак, вслед -

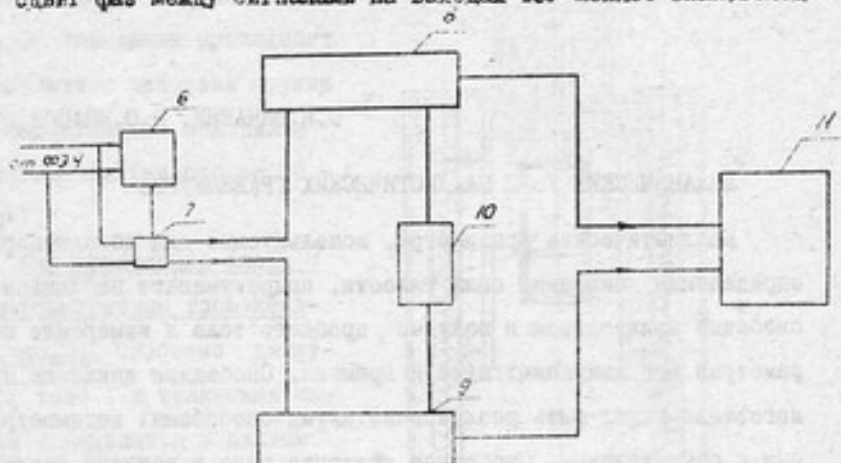


Рис.2. Схема измерения времени

ствие чего фазовый детектор 6 вырабатывает сигнал, по которому фазовый ключ 7 выключает счетчик 8 и включает счетчик 9. После того как счетчиком 9 будет зарегистрировано число импульсов пути, набранное счетчиком 8, блок остановки 10 выключает счетчик 9. Последний импульс, зарегистрированный счетчиком 9, выключает схему измерения времени 11. Для исключения погрешности измерения, связанной с неопределенностью в вершине траектории движения отражателя 2, измерения ведутся двумя идентичными схемами на двух участках траектории. Разработанный метод позволяет применить для абсолютных определений ускорения силы тяжести наиболее монохроматичные и стабильные в настоящее время источники света - ОКГ и достаточно полно реализовать возможности, заложенные в симметричных баллистических методах.

С.И.ВИКАРИЙ, Н.С.ИВАНОВ

### МЕХАНИЧЕСКИЕ УЗЛЫ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ГРАВИМЕТРОВ

Баллистические гравиметры, используемые для абсолютного определения ускорения силы тяжести, подразумевают наблюдение свободно движущегося в вакууме пробного тела и измерение параметров его движения: пути и времени. Свободное движение пробного тела может быть реализовано двумя способами: несимметричным и симметричным. Свободное движение тела в вакууме реализуется в механических устройствах - баллистических блоках. Их принцип работы зависит от выбранного способа наблюдения. В ХГНИИМ созданы и исследованы баллистические блоки как для несимметричного способа наблюдения, так и для симметричного.

Баллистический блок для несимметричного способа наблюдений (рис.1). Свободно падающее тело 1 с смонтированным в него уголковым отражателем 2 интерферометра удерживается в верхнем положении соленоидом 3. При этом наружная каретка 4, снабженная тремя цилиндрическими штирями 5 (с помощью штирей свободно падающее тело 1, имеющее три специально спрофилированных окна, фиксируется в строго определенном положении), удерживается электромагнитом 6. Каретка движется на подшипниках по направляющим трубам 7. При одновременном обесточивании соленоида 3 и электромагнита 6 тело 1 и каретка 4 отрываются и падают под действием силы тяжести. Тело 1 опере-



двигает каретку 4, которая движется по подшипникам, сходит со штырей 5 и падает свободно. Возвращение каретки со свободно падающим телом в верхнее начальное положение происходит в результате действия пружин 8 и специального механизма подтягивания (на рис. не показан).

Баллистический блок с электромагнитным торможением (рис. 2). Свободно движущееся тело 1 и толкающая каретка 2 находятся в нижнем крайнем положении. При включении электромагнита 3 сердечник 4 втягивается, происходит выталкивание толкающей каретки и свободно падающего тела с угловым отражателем 5 интерферометра. Тело при движении вверх опережает каретку, движущуюся на подшипниках (с трением) по направляющим, при движении вниз догоняет. При подходе к нижнему положению каретка тормозится тем же электромагнитом 3.

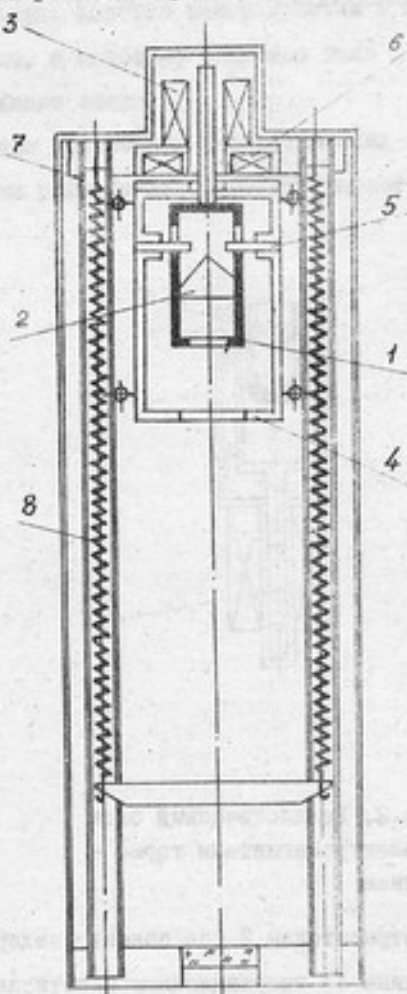


Рис. 1. Баллистический блок для несимметричного способа наблюдений

Баллистический блок с механическим торможением падающего тела (рис.3). В этом блоке свободно падающее тело I с уголко-

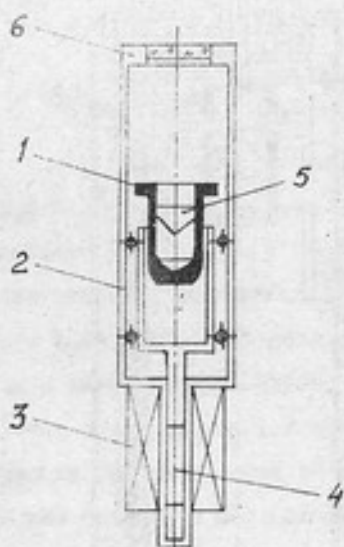


Рис.2. Баллистический блок с электромагнитным торможением

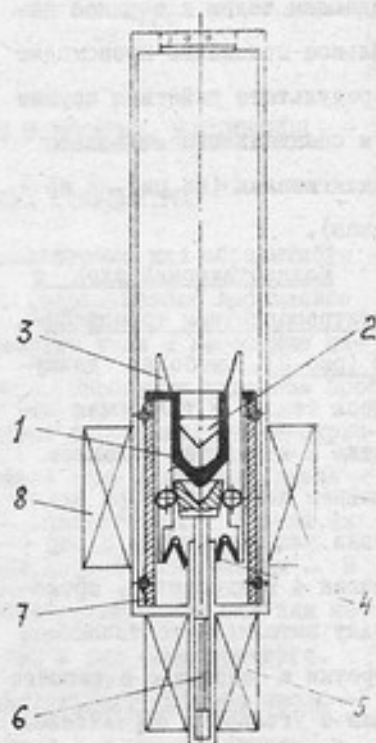


Рис.3. Баллистический блок с механическим торможением падающего тела

вым отражателем 2 при падении задерживается подпружиненными (пружина 4) направляющими пластинами 3. Перед подбросыванием тела вверх включается электромагнит 5, который втягивает вниз толкатель 6. Толкатель своей конической шляпкой раздвигает пластины 3, освобождая падающее тело I, которое садится своими рожками на верхнюю плоскость подбрасывающей каретки 7.

Затем включается электромагнит 8, который подбрасывает каретку 7 с падающим телом I вверх. Каретка задерживается в нижней части баллистического блока, а свободно падающее тело I отрывается и продолжает движение вверх.

Описанные выше принципы построения баллистических блоков использованы при разработке ряда баллистических гравиметров ХГНИИМ.

С.С.БОНДАРЕВ, В.Н. БРЕНЕР,  
Ю.Л.СМЕЛЯНСКИЙ

НАХОЖДЕНИЕ НЕСМЕЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Большинство приборов для измерения ускорения силы тяжести в силу своей специфики позволяет определить лишь интегральную оценку ускорения силы тяжести, отягощенную воздействием возмущающих ускорений. В силу этого естественной является методика выделения несмещенной оценки значения ускорения силы тяжести, опирающаяся на аппарат корреляционного анализа, и представление возмущающих воздействий в виде случайных функций, обеспечивающих получение "квaziточечных" суммарных значений ускорения силы тяжести и возмущений.

Абсолютные баллистические гравиметры (в значительной мере это относится и к струнным гравиметрам) позволяют использовать предложенную авторами новую методику. Не нарушая общности подхода, остановимся на частном случае, когда поле силы тяжести Земли за время наблюдений можно считать постоянным. Такой случай распространяется на ограниченное время наблюдений, что представляет особый интерес при детальном изучении поля. При этом из простых физических соображений очевидно, что:

- 1) случайные возмущения представляют собой простой эргодический процесс;
- 2) возмущающие воздействия имеют ограниченный

спектр, содержащий конечное число периодических составляющих.

Эти предположения позволяют представить значения ускорения силы тяжести как мгновенные значения некоторой полигармонической функции вида

$$g_t = g_0 + \sum_{j=1}^n (a_j \sin \frac{2\pi}{T_j} t + b_j \cos \frac{2\pi}{T_j} t),$$

где  $g_0$  - действующее значение ускорения силы тяжести;  $a_j, b_j$  - амплитуды синусной и косинусной составляющих возмущающих ускорений;  $\omega_j = \frac{2\pi}{T_j}$  - круговая частота возмущающих ускорений.

Таким образом, задача получения несмещенной оценки величины ускорения силы тяжести сводится к двум: 1) к выявлению скрытых периодичностей и определению  $\omega_j = \frac{2\pi}{T_j}$ ; 2) к определению амплитуд возмущений  $a_j$  и  $b_j$  и несмещенной оценке  $g_0$ .

Для выявления скрытых периодичностей могут быть использованы различные методы (Бью-Балло, корреляционный и пр.). Сравнительный анализ этих методов на ЭВМ "Наври-2" показал, что наибольшую эффективность при сравнительно простой машинной реализации дает интегральное преобразование Фурье. При этом предположим, что анализируемая функция задана на отрезке  $(-L, L)$ , а вне этого отрезка функция тождественно равна нулю.

Для функции такого вида интегральное преобразование Фурье имеет вид

$$F(i\omega) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L x(t) e^{-i\omega t} dt = U(\omega) - iV(\omega),$$

где  $U(\omega) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L x(t) \cos \omega t dt$  - косинус - преобразование Фурье;  $V(\omega) = \frac{1}{L} \int_{-L}^L x(t) \sin \omega t dt$  - синус - преобразование Фурье.

Если частоты гармонических компонент, входящих в  $x(t)$ , не являются слишком близкими, то зависимости  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$  представляет собой кривые с резко выраженными пиками в точках  $\omega_j = \frac{2\pi}{T_j}$ . Для нашего случая дискретного представления исследуемой функции в конечном числе точек  $N$  ( $N$  - нечетное!) операцию интегрирования следует заменить операцией суммирования, т.е. представить функции  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$  в виде

$$U(\omega) = \frac{2}{2N+1} \sum_{\kappa=0}^{2N} x\left(\frac{\kappa L}{N}\right) \cos \frac{\kappa L}{N} \omega_j;$$

$$V(\omega) = \frac{2}{2N+1} \sum_{\kappa=0}^{2N} x\left(\frac{\kappa L}{N}\right) \sin \frac{\kappa L}{N} \omega_j.$$

Для получения несмещенной оценки  $g_0$ ,  $a_j$  и  $b_j$  достаточно жестким критерием является метод наименьших квадратов. Полигармоническая функция, заданная своими точечными значениями, может быть представлена в виде

$$g_i = x_0 + \sum_{j=1}^{\ell} [x_{2j-1} \sin \frac{2\pi}{T_{2j-1}} t_i + x_{2j} \cos \frac{2\pi}{T_{2j}} t_i], \quad (1)$$

где  $\ell$  - количество ярко выраженных максимумов  $U(\omega)$  и  $V(\omega)$ ;  
 $x_0 = g_0$ ;  $T_j$  - выявленные периоды возмущений;

$$T_1 = T_2, T_3 = T_4, \dots, T_{j-1} = T_j, \dots, T_{\ell-1} = T_{\ell}.$$

Коэффициенты  $C_{j\kappa}$  и  $C_j$  для решения системы нормальных уравнений

$$\|C_{j\kappa}\| \cdot \|X_j\| = \|C_j\| \quad (2)$$

метода наименьших квадратов имеют следующий вид:

$$C_{j\kappa} = \sum_{i=0}^{N-1} \sin\left(\frac{2\pi}{T_j} i \Delta t + \frac{\pi \kappa}{2}\right) \sin\left(\frac{2\pi}{T_j} i \Delta t + \frac{\pi \kappa}{2}\right);$$

$$C_{00} = N,$$

$$C_i = \sum_{i=0}^{N-1} g_i \sin\left(\frac{2\pi}{T} i \Delta t + \frac{\pi Z}{2}\right),$$

$$C_0 = \sum_{i=0}^{N-1} g_i; \quad (3)$$

$$y = \begin{cases} 1 & \text{при } \kappa - \text{четном;} \\ 0 & \text{при } \kappa - \text{нечетном;} \end{cases}$$

$$z = \begin{cases} 1 & \text{при } j - \text{четном;} \\ 0 & \text{при } j - \text{нечетном.} \end{cases}$$

Решением уравнения (2) будет

$$x_j = \frac{D_j}{D}, \quad (4)$$

где  $D$  - определитель, составленный из коэффициентов  $C_{jk}$ ;  $D_j$  - определитель, в котором ( $j$ ) столбец заменен столбцом, составленным из элементов  $C_j$ ;  $x_1, x_2, \dots, x_j$  - амплитуды гармонических компонент возмущений.

Оценка дисперсии ( $S^2$ ) определяется выражением

$$S^2 = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=0}^{N-1} \left[ g_i - \sum_{j=1}^k x_j \sin\left(\frac{2\pi}{T} t_i + \frac{\pi Z}{2}\right) \right]^2. \quad (5)$$

Для исследования эффективности предложенной методики проведен численный анализ искусственно полученных массивов на ЭВМ "Наира-2":

- массив № 1 вида  $x_i = 1 + \sum_{j=0}^k a_j \sin \omega_j t_i$ ;

- массив № 2 вида  $x_i = g_i + \sum_{j=0}^k a_j \sin \omega_j t_i$ .

Здесь  $g_i$  - массив измеренных значений ускорения силы тяжести на неподвижном основании с размахом вариация 6 мгал и нормальным распределением.

Результаты численного анализа приведены в таблице.

Таблица

Вид мас - сива	Амплитуда возмущающих ускорений, гал	Время реа- лиза- ции, мин	Шаг изо- рен., с	Отклонение (в мгал) от истинного значения	
				простое осреднен.	полигар- мониче - ское
# 1	от 0,1 до 5	5	1	до 500	0,001
	от 10 до 100	5	5	до 5000	0,001
# 2	от 0,1 до 5	5	1	до 500	0,15
	от 10 до 100	5	5	до 5000	0,15

Численный анализ показал, что для эффективного периода-грамм анализа достаточна выборка длительностью 8+10 макси-мальных периодов спектра возмущений, а для эффективного при-ближения методом наименьших квадратов - 1,5 + 3 периода.



В.Д.ШУРУБКИН

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДЛИННОПЕРИОДНОГО  
ДИНАМИЧЕСКОГО ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИИ  
НА МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКЕ

Известно, что установка уголкового светоотражателя референтного плеча интерферометра на инерционной массе динамического гасителя вертикальных перемещений с большим собственным периодом может существенно понизить влияние вертикальных перемещений измерительной части гравиметра на точность абсолютно — го определения ускорения силы тяжести. Рассмотрим принцип построения длиннопериодного динамического гасителя вертикальных перемещений на магнитной подвеске с электромагнитной системой горизонтальной стабилизации.

Устройство динамического гасителя (рис.1) состоит из соленоида 4 с сердечником из магнитомягкого материала 5, индуктивного датчика вертикальных перемещений 1, электронной системы стабилизации жесткости тяговой характеристикой соленоида 3 и из двух поясов системы горизонтальной стабилизации 2. Уголкового светоотражателя 6 референтного плеча интерферометра установлен на инерционной массе динамического гасителя.

Система горизонтальной стабилизации служит для полного исключения механического трения подвижной системы и состоит из магнитных направляющих, выполненных по принципу электро —

магнитного подшипника с "резонансной" цепью и внешнего контура обратной связи (на рисунке не показан). Контур обратной связи служит для повышения жесткости системы горизонтальной стабилизации и демпфирования горизонтальных ускорений, действующих на подвижную систему динамического гасителя. Для предотвращения вращения подвижной части системы вокруг вертикальной оси ее магнитопровод выполнен в виде полюсов, разделенных немагнитным материалом. С увеличением периода собственных колебаний виброзащитные свойства динамического гасителя повышаются. Так как величина инерционной массы незначительна (несколько сот граммов), то период порядка нескольких десятков секунд может быть достигнут только за счет малой жесткости подвески.

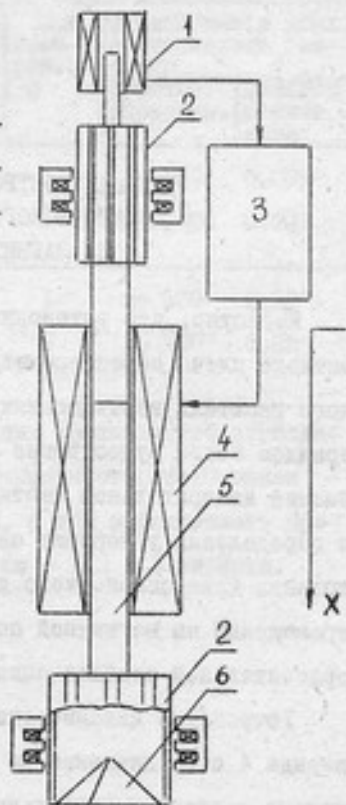


Рис.1. Динамический гаситель

Тяговое усилие, развиваемое соленоидом, зависит как от перемещения сердечника в соленоиде, так и от тока, протекающего по нему:

$$F_{\text{сод}} = f(j, x) = A(j) \cdot B(x). \quad (1)$$

Семейство характеристик тягового усилия соленоида (рис.2) можно разбить на три зоны: 1) неустойчивого положения -  $\frac{dF_{\text{сол}}}{dX} < 0$ ; 2) постоянной тяги -  $\frac{dF_{\text{сол}}}{dX} = 0$ ; 3) устойчивого положения -  $\frac{dF_{\text{сол}}}{dX} > 0$ . За положительное направление принято движение вниз. В зоне устойчивого положения жесткость магнитной подвески велика и обладает нелинейными свойствами.

Для расширения рабочего диапазона тяговой характеристики соленоида и обеспечения малой постоянной жесткости подвески во всем рабочем диапазоне при одновременной компенсации веса инерционной массы может быть применен принцип параметрической стабилизации, т.е. жесткость должна быть инвариантна перемещению инерционной массы.

Рассмотрим структурную схему системы стабилизации жесткости подвески с учетом нелинейных свойств многочленов  $A(j)$  и  $B(x)$ , входящих в формулу (1). Будем считать входной величиной перемещение  $\Delta X$ , а выходной - изменение тягового усилия, развиваемого соленоидом  $\Delta F_{\text{сол}}$  (рис.3).

Зададим закон изменения тягового усилия  $\Delta F_{\text{заг}} = C \Delta X$ , где  $C$  - постоянная величина, заданная жесткостью подвески.

На выходе сравнивающего устройства имеем  $\Delta F = \Delta F_{\text{заг}} - \Delta F_{\text{сол}}$ .

На выходе регулятора  $\Delta U_{\text{рег}} = W_{\text{рег}}(p) \cdot \Delta F$ , где  $W_{\text{рег}}(p)$  - передаточная функция регулятора.

Это напряжение преобразуется в ток, питающий соленоид.

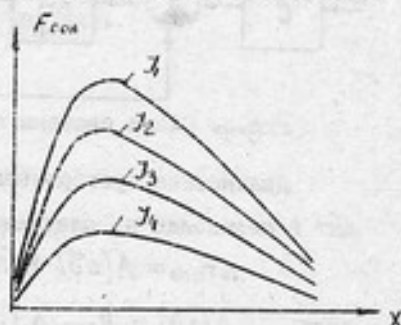


Рис.2. Тяговые характеристики соленоида

по закону  $\Delta J = \frac{\Delta U_{\text{рес}}}{T_c p + 1}$  (где  $T_c = \frac{L_c}{R}$  - постоянная времени соленоида;  $R$  - активное сопротивление соленоида;  $L_c$  - индуктивность катушки соленоида).

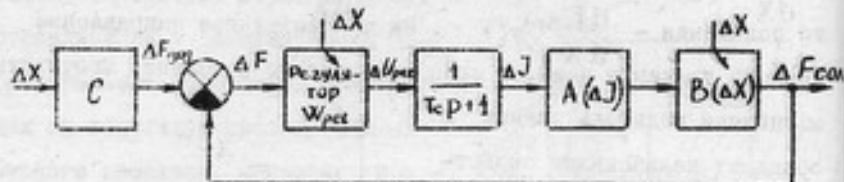


Рис.3. Схема системы стабилизации жесткости подвески

Дальнейшие преобразования тока в тяговое усилие происходит в соленоиде по следующему закону:

$$\Delta F_{\text{сол}} = A(\Delta J) \cdot B(\Delta X),$$

если  $A(\Delta J) = k_{\text{сол}} (\Delta J)^2$

(где  $k_{\text{сол}}$  - коэффициент, зависящий от конструктивных форм сердечника и соленоида, - величина постоянная;  $B(\Delta X)$  - переменный коэффициент).

Уравнение разомкнутой системы имеет вид

$$\Delta F_{\text{сол}} = \Delta X \cdot C \cdot W_{\text{рес}}(p) \frac{k_{\text{сол}}}{\frac{1}{2} T_c^2 p^2 + \frac{3}{2} T_c p + R^2} B(\Delta X),$$

а передаточная функция

$$W_{\text{раз}}(p) = \frac{\Delta F_{\text{сол}}(p)}{\Delta X(p)} = C \cdot W_{\text{рес}}(p) \frac{k_{\text{сол}}}{\frac{1}{2} T_c^2 p^2 + \frac{3}{2} T_c p + R^2}.$$

Передаточная функция замкнутой системы запишется так:

$$W_{\text{зам}}(p) = \frac{W_{\text{раз}}(p)}{1 + W_{\text{раз}}(p)} = \frac{C \cdot W_{\text{рес}}(p) k_{\text{сол}} B(\Delta X)}{\frac{1}{2} T_c^2 p^2 + \frac{3}{2} T_c p + R^2 + W_{\text{рес}}(p) \cdot B(\Delta X)}$$

Если передаточную функцию регулятора реализовать так, что:

$$W_{\text{рес}}(p) = \frac{(\frac{1}{2} T_{\text{рес}}^2 p^2 + \frac{3}{2} T_{\text{рес}} p + R^2) k_{\text{рес}}}{B(\Delta X)},$$

где

$$T_{\text{рес}} = T_{\text{сол}}, \quad k_{\text{рес}} \gg 1,$$

$$\text{то } \frac{W_{\text{рег}}(p) \cdot k_{\text{сол}} B(\Delta X)}{\frac{1}{2} T_c^2 p^2 + \frac{3}{2} T_c p + R^2 + W_{\text{рег}}(p) k_{\text{сол}} B(\Delta X)} \approx 1,$$

а передаточная функция замкнутой системы будет  $W_{\text{зам}}(p) = C$

Следовательно, выбором передаточной функции регулятора можно полностью компенсировать нелинейные свойства тяговой характеристики соленоида и исключить влияние его постоянной времени на динамические свойства гасителя.

В.В.АРБЕНИН, Б.М.ЗАНИМОНСКИЙ,  
М.В.ЗОМОЧЕВСКИЙ, И.Л.РАЧИНСКИЙ

### ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПУТИ В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ

В современных баллистических гравиметрах для получения информации о пространственно-временных параметрах движения пробного тела, как правило, используется интерферометрический принцип измерения пути. Лазерные датчики пути (ЛДП) баллистических гравиметров, принципиально не отличаясь от интерферометров, применяемых в лазерных измерителях перемещений (ИИП) [ 1,2 ], обладают, однако, рядом существенных схемных и конструктивных особенностей, обусловленных спецификой применения. Баллистические гравиметры работают в сложных климатических условиях, при резких колебаниях температуры, повышенной влажности и запыленности, больших возмущающих ускорениях и должны выдерживать перевозку любыми видами транспорта. Кроме того, ЛДП должен быть компактным, легким, простым и удобным в работе, доступным для обслуживания малоквалифицированным персоналом. Все эти требования, в первую очередь, относятся к лазеру, применяемому в ЛДП, так как его высокая чувствительность к различным внешним воздействиям очень затрудняет создание приемлемой конструкции.

В отделе гравиметрии ХИНИИМ разработана конструкция ре-

резонатора He-Ne лазера, удовлетворяющая по механическим характеристикам вышеперечисленным требованиям. В качестве активного элемента в этой конструкции используется газоразрядная трубка, разработанная в Институте автоматизации и электрометрии СО АН СССР. Резонатор выполнен квази-полусферическим с параметрами  $R_1 = 185$  мм,  $R_2 = 500$  мм,  $L = 175$  мм, выход через зеркало  $R_1$  (рис.1). Лазер остуруется перпендикулярными к оси перемещениями зеркал, прижатых к шлифованным торцам инваровой распорки резонатора. На их сферических поверхностях имеются плоские шлифованные пояски (параллельные наружным граням), которыми они прижимаются к распорке. Для регулировки и стабилизации длины волны излучения необходимо обеспечить сканирование длин резонатора. Обычно сканирование осуществляется с помощью пьезокерамики, к которой приклеиваются эпоксидным клеем или хрепятся через приклеенный переходник зеркала. Такая конструкция узла сканирования малоприспособна для использования в лазерах, работающих в полевых условиях и в других случаях, когда ДДП подвергается сильным механическим и температурным воздействиям.

В описываемом лазере резонатор сканируется с помощью электромагнита, смонтированного в распорку и притягивающего якорь. Якорь изготовлен из инвара и представляет собой двойную круглую диафрагму, диаметр которой равен диаметру корпуса распорки. Шлифованная плоскость, к которой прижимается зеркало, составляет единое целое с диафрагмой. Двойная диафрагма обеспечивает строго параллельное перемещение зеркала на величину порядка 20 мм. В зависимости от условий, в которых должен работать гравиметр, применяется один из вариантов ДДП

(см. рис.2,а,б,в,г).

Схема, изображенная на рис.2,а, применяется в ДДП, работающем в составе полевого гравиметра. Она отличается от известных авторам аналогов [ I ] тем, что сдвиг фаз в приемных каналах достигается взаимным поворотом анализаторов, выделяющих интерферирующие пучки из двух циркулярно поляризованных в противоположных направлениях волн. Циркулярная поляризация осуществляется с помощью параллелепипеда Френеля. Кроме того, интерферирующие пучки могут быть несоосны, так как на диафрагму, установленную перед фотоприемниками, они фокусируются длиннофокусной ( $\sim 50$  см) оптической системой. Обратная связь с лазером устраняется геометрическим построением схемы. Один период выходного электрического сигнала соответствует  $\lambda / 2$  перемещения углового отражателя пробного тела.

Схема, показанная на рис.2,б, применяется в ДДП, работающем в тех же условиях, что и предыдущая, но отличается полной нечувствительностью к смещениям рабочего пучка. Величина допустимого смещения ограничивается только апертурой углового отражателя. Очевидно, что ДДП, работающий по такой схеме, может функционировать в условиях значительных горизонтальных ускорений. Обратная связь с лазером устраняется с помощью оптического вентиля на базе параллелепипеда Френеля. Один период выходного электрического сигнала соответствует  $\lambda / 4$  перемещения углового отражателя пробного тела.

Схема рис.2,в применяется в ДДП, работающем в условиях значительных вертикальных ускорений и наклонов, и позволяет применять динамический поглотитель для компенсации вертикальных ускорений. Схема построена таким образом, что демпфи-



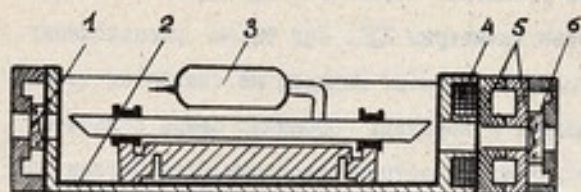


Рис.1. Принципиальная схема конструкции ОКТ:

1 - зеркало  $R_1$ ; 2 - корпус резонатора; 3 - активный элемент; 4 - катушка электромагнита; 5 - диафрагма; 6 - зеркало  $R_2$

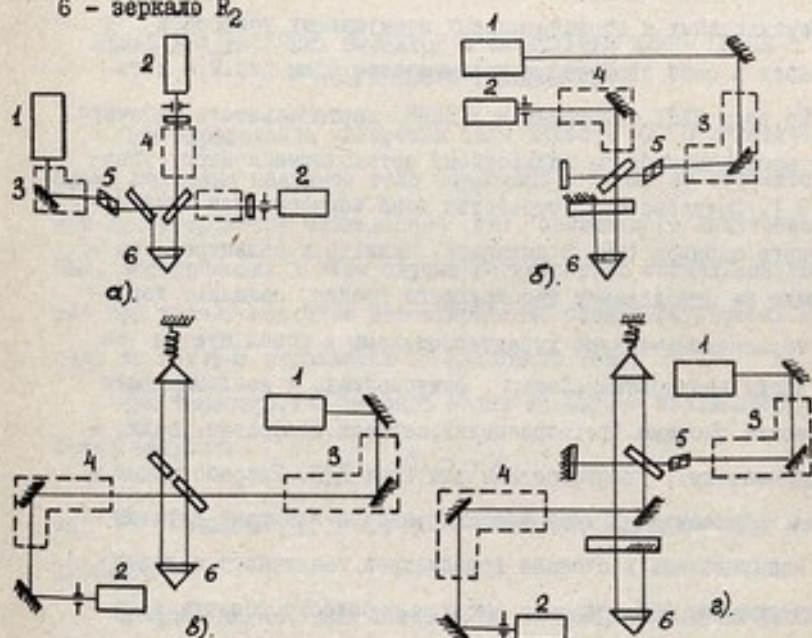


Рис.2. Схемы оптические принципиальные: 1 - лазер; 2 - фотоприемник; 3 - коллимирующая оптическая система; 4 - фокусирующая оптическая система; 5 - параллелепипед Френеля; 6 - угловой отражатель

рованный и рабочий уголкового отражателя находятся на одной осев, являющейся осью симметрии ДДП. При таком расположении компенсируемого "плеча" в момент наклона не создается дополнительных вертикальных ускорений. Обратная связь с лазером устраняется геометрическим построением схемы. Один период выходного электрического сигнала соответствует  $\lambda/2$  перемещения уголкового отражателя пробного тела. Схема, данная на рис. 2, г, предназначается для ДДП, работающего в условиях больших вертикальных и горизонтальных возмущающих ускорений и совмещает в себе свойства и преимущества схем рис. 2, б и г.

Во всех ДДП, созданных в ХГНИИМ, вертикальность рабочего пучка настраивается по жидкостному автоколлимационному уровню [ 3 ]. Остриевочные устройства типа шарового или цилиндрического шарнира (шар в цилиндре, цилиндр в цилиндре), работающие на преодолении фиксирующего трения, обладают хорошими термомеханическими характеристиками и используются во всех наших разработках. Лазеры, фокусирующие и коллимирующие оптические системы (фотоприемники, зеркала, диафрагмы, уголко-вые отражатели), унифицированы для всех ДДП. Разработанные в отделе гравиметрии ХГНИИМ унифицированные лазерные датчики пути испытывались в составе гравиметров различного целевого назначения. Все ДДП показали высокую работоспособность и надежность.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Коломийцов Ю.В. Интерферометры. М., "Машиностроение", 1976, с. 295.
2. Романюк В.А. Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести (теория). Берлин/нем, АН СССР ИИЗ, 1974, 294 с.
3. Арсенин В.В. и др. Способ определения отклонения светового луча от вертикали", Авт. свид. №301532, "Бюл. изобр. 1971, №14.

Е.М.ЗАНИМОНСКИЙ, О.Н.МИРОШНИЧЕНКО,  
С.М.ОХОТИНА

ВКЛАД КВАДРАТИЧНЫХ ЭФФЕКТОВ И ФЛУКТУАЦИЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  
В ПОГРЕШНОСТЬ ГРАВИМЕТРА

При определении ускорения силы тяжести  $g$  баллистическими методами падающее тело совмещено с одним из отражателей интерферометра Майкельсона (ИМ), освещаемого излучением ОКГ. Фотоприемник в этом случае регистрирует сигнал, возникающий при квазиотдельном детектировании облученных оптических волн, одна из которых отражается от падающего тела.

Как известно, для плоской волны на выходе коллиматора можно записать

$$E = A \cdot \cos \Psi_t, \quad (I)$$

где  $A$  - амплитуда поля;  $\Psi_t$  - текущее значение фазы колебаний.

Аналогично (I) для полей волн, сформированных на фотоприемнике неподвижным и подвижным отражателями, имеем:

$$E_H = A \cdot \cos \Psi_t - \frac{\chi_1}{c}; \quad E_n = A \cdot \cos \Psi_t' - \frac{\chi_2'}{c}, \quad (2)$$

где  $\chi_1$  - оптическая длина плеча ИМ, связанного с неподвижным отражателем, от коллиматора до фотоприемника в неподвижной системе координат;  $\chi_2'$  - оптическая длина плеча ИМ, связанного с подвижным отражателем, от коллиматора до фотоприемника в движущейся системе координат;  $t'$  - время в движущейся

ся системе координат;  $C$  - скорость света.

В выражениях (2) текущее значение фазы может быть выражено через мгновенное значение частоты:

$$\Psi_{t-\frac{x_1}{c}} = \int_{-\frac{x_2}{c}}^{t-\frac{x_1}{c}} \omega dt; \quad (3a)$$

$$\Psi'_{t'-\frac{x'_1}{c}} = \int_{-\frac{x'_2}{c}}^{t'-\frac{x'_1}{c}} \omega d(t'-\frac{x'_1}{c}). \quad (3b)$$

Применяя к формуле (3b) преобразование Лоренца и пренебрегая членами второго порядка малости, получим

$$\Psi'_{t'-\frac{x'_1}{c}} = \int_{-\frac{x'_2}{c}}^{t'-\frac{x'_1}{c}} \omega dt - \frac{2}{c} \int_{-\frac{x'_2}{c}}^{t'-\frac{x'_1}{c}} V \omega dt.$$

В результате обiena оптических волн интенсивность поля на выходе ИМ модулируется квазигармоническим сигналом, фаза которого  $\varphi$  содержит информацию об оптической разности хода в интерферометре, изменяющейся в процессе движения отражателя:

$$\varphi = \Psi_{t-\frac{x_1}{c}} - \Psi'_{t'-\frac{x'_1}{c}} = \frac{1}{c} [(x_2 - x_1)(\omega_t - \omega_0) + 2 \int_{-\frac{x_2}{c}}^{t-\frac{x_1}{c}} V \omega dt],$$

где  $x_2 - x_1$  - начальная оптическая разность хода в ИМ;  $\omega_t$  и  $\omega_0$  - средние значения частоты излучения за время от  $t - \frac{x_2}{c}$  до  $t - \frac{x_1}{c}$  и от  $-\frac{x_2}{c}$  до  $-\frac{x_1}{c}$  соответственно;  $V$  - скорость движения отражателя.

В гравиметре измеряется приращение оптической разности хода, определяемое высотой падения тела, за два смежных, как правило, отрезка времени. В этом случае для приращений фазы на первом и втором интервалах можно записать

$$\varphi_1 = \frac{1}{c} [(x_2 - x_1)(\omega_1 - \omega_0) + 2 \int_{-\frac{x_2}{c}}^{t_1 - \frac{x_1}{c}} V \omega dt];$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{c} [(x_3 - x_1)(\omega_2 - \omega_1) + 2 \int_{t_1 - \frac{x_2}{c}}^{t_2 - \frac{x_1}{c}} V \omega dt],$$

где  $X_3 - X_1$  - оптическая разность хода в момент прохождения телом границы двух интервалов.

Усредняя по времени разность  $\varphi_2 - \varphi_1$  и пренебрегая в пределах интегралов величинами  $\frac{X_i}{c}$  (т.е. абберацией света), получаем

$$\overline{\varphi_2 - \varphi_1} = \frac{4\pi}{\lambda} \overline{(h_2 - h_1)}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  - долговременное среднее значение длины волны излучения ОКГ;  $h_1, h_2$  - высоты падения за время  $t_1$  и  $t_2 - t_1$  соответственно.

Определяя на опыте  $\overline{\varphi_2 - \varphi_1}$ , можно затем, используя (4), вычислять  $\overline{h_2 - h_1}$ , а, зная  $t_1$  и  $t_2 - t_1$ , найти ускорение силы тяжести  $g$ . Одним из источников разброса результатов наблюдений при измерениях  $g$  является нестабильность длины волны ОКГ, от которой зависит дисперсия величины  $\varphi_2 - \varphi_1$  и, следовательно, дисперсия  $h_2 - h_1$ . Для последней можно записать

$$M_2\{h_2 - h_1\} = \frac{1}{4} M_2\left\{\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right\} [(X_3 - X_1)^2 + (X_2 - X_1)^2 - 2\tau_1(X_3 - X_1)(X_2 - X_1)] + M_2\left\{\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right\} (h_2^2 + h_1^2 - 2\tau_2 h_2 h_1), \quad (5)$$

где  $M_2\left\{\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right\}$  - дисперсия относительного приращения мгновенного (время усреднения  $\sim 10^{-8}$  с) значения длины волны ОКГ;

$M_2\left\{\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right\}$  - дисперсия относительного приращения кратковременного среднего (время усреднения  $\sim t_1$ ) значения длины волны;

$\tau_1, \tau_2$  - коэффициенты корреляции мгновенных и средних значений длин волн для выбранных интервалов  $t_1$  и  $t_2$ .

Дисперсия  $M_2\{h_2 - h_1\}$  записана с допущением об отсутствии корреляции между мгновенными и средними значениями длин волн и зависит от оптической разности хода на границах интервалов  $X_3 - X_1$ ,  $X_2 - X_1$ , а также от соотношения высот.

Поэтому для уменьшения  $M_2\{h_2-h_1\}$  необходимо выбирать такую геометрию ИМ, при которой  $\chi_2-\chi_1$  и  $\chi_3-\chi_1$  равняются нулю, т.е. первое слагаемое в выражении (5) минимально.

Таким образом,  $M_2\{h_2-h_1\}$  определяется через величины  $M_2\{\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\}$ ,  $M_2\{\frac{\delta\lambda}{\lambda}\}$ ,  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ , которые зависят от конструкции ОКГ степени его виброизоляции, режима работы, наличия обратной связи с интерферометром и т.д. Измерения флуктуаций длины волны промышленных ОКГ (стабилизированных по "провалу Лемба"), применяемых в гравиметрах, проведены методом гетеродинного детектирования. Среднее квадратическое отклонение (СКО) в 20-секундном цикле измерения мгновенного значения длины волны составило  $2 \cdot 10^{-9}$  мм, а кратковременного среднего - около  $1 \cdot 10^{-9}$ . Коэффициенты корреляции  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  близки к нулю. Используя результаты этих измерений и полагая  $h_2 + h_1 = 1$  м,  $\chi_2 - \chi_1 = 3$  м, по формуле (5) получим СКО разности высот равным  $7 \cdot 10^{-3}$  мм или в относительном выражении  $1,4 \cdot 10^{-6}$ .

В том случае, когда оптическая разность хода в интерферометре соответствует границе двух интервалов, СКО разности высот уменьшается до  $1,3 \cdot 10^{-8}$  мм. Если, преобразовывая выражение (36), учесть влияние квадратичного эффекта Доплера и абберации света, то в формуле (4) появятся дополнительные члены, относительный вклад которых  $3 \cdot 10^{-8}$  и  $1,3 \cdot 10^{-8}$  соответственно.

В.Н.БРЕНЕР, В.Г.МЕДРЕВ, В.А.ПЕТИК,  
В.П.ХАДЖАЕВ, И.Я.ХАСКИН

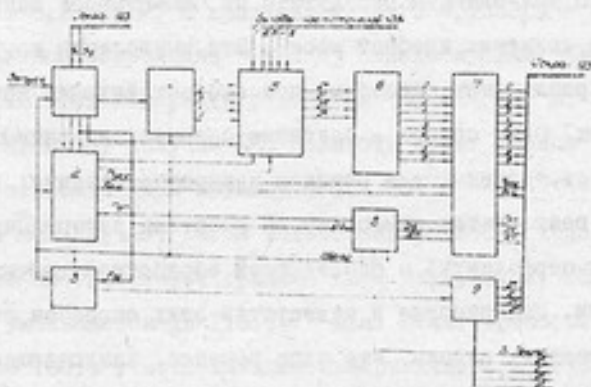
УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИЗМЕРЕНИИ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Баллистический метод измерения ускорения силы тяжести связан с вычислением результата по измеренным данным пути и времени движения пробной массы. Эти вычисления могут производиться различными способами при соответствующих аппаратурных решениях. Один способ - создание специализированных вычислителей, построенных для решения конкретной задачи; другой - запись результатов измерений на носитель информации (магнитную или перфоленту) с последующей обработкой данных при помощи ЭВМ. Достоинства и недостатки этих способов очевидны.

Имеется, однако, еще одно решение, заключающееся в использовании малогабаритных настольных клавишных вычислительных машин (ЭКВМ), парк которых в настоящее время достаточно расширен. Если дополнить такую машину каналом электрического ввода данных, то предоставляется возможность применить ее для вычисления искомого значения  $g$  по данным измерения пути и времени.

В ИГНИИ разработано устройство для обработки результатов измерений, позволяющее ввести пять восьмиразрядных чисел

для последующей обработки по заданной программе. При разработке устройства использовалась ЭКМ с программным управлением типа "Искра 123". Ввод данных и управление работой ЭКМ осуществляется с помощью специального блока ввода данных (БВД) который совместно с вычислительной машиной "Искра-123" и составляет устройство обработки результатов измерений (УОР). Помимо вычисления и индикации результатов измерений на цифровом табло "Искра-123" в устройстве предусмотрен вывод результатов на цифropечать (или перфоратор) в коде 8-4-2-1. Структурная схема блока ввода данных приведена на рисунке.



Структурная схема блока ввода данных: 1. Схема запуска и преобразования тактовых импульсов; 2. Формирователь импульсов ввода числа; 3. Схема задержки и запрета; 4. Схема стробирования коммутатора; 5. Коммутатор и регистр сдвига; 6. Дешифратор двоично-десятичного кода в десятичный; 7. Согласующее устройство; 8. Схема блокировки; 9. Запоминающее устройство



Измеренные гравиметром параметры пути и времени от пяти частотомеров ЧЗ-34 параллельным восьмизначным двоично-десятичным кодом поступают на коммутатор 5. При подаче команды "Запуск" от гравиметра (или вручную от кнопки) информация от первого частотомера записывается в регистр сдвига. Одновременно запускается формирователь импульсов ввода числа 2, в котором используются тактовые частоты  $f_{T1}$  и  $f_{T2}$ , подаваемые из блока от ЭКВМ "Искра-120". Формирователь вырабатывает сигналы "Пуск", приемная цифра "Клц", подаваемые в ЭКВМ, и импульсы сдвига тетрад коммутатора. При этом информация первого частотомера через дешифратор 6 и согласующее устройство 7 поступает в регистр клавиатуры ЭКВМ. Числа второго и остальных частотомеров вводятся аналогично числам от первого частотомера после срабатывания схемы задержки и запрета 3. После ввода числа пятого частотомера срабатывает схема запрета запуска 3.

После подачи пятого импульса "Пуск" ЭКВМ производит окончательное вычисление по предварительно набранной программе и через интервал порядка секунды формируются восемь импульсов для записи восьми старших разрядов результата индикаторного табло ЭКВМ в запоминающее устройство 9 блока БВД. По окончании записи результата вычислений в запоминающем устройстве схемой блокировки 8 вырабатывается импульс готовности к печати, а также импульс сброса блока БВД. В автоматическом режиме работы в случае переполнения разрядной сетки машины схемой блокировки формируется перепад уровня, блокирующий формирователь импульсов ввода числа 2, а для приведения машины в рабочее состояние автоматически выдаются в ЭКВМ импульсы "СК" и "КП". Конструктивно БВД выполнен на семи платах с применением ИМС се -

рии 155 и 194. Габариты блока, мм: 400x250x160.

Наличие в машине "Искра-123" пяти регистров памяти в устройстве запоминания программы на 71 шаг позволяет, помимо вычисления единичных значений  $g_i$ , произвести статистическую обработку массива значений  $g_i$  без применения каких-либо дополнительных устройств или перестройки программы. Для этого в трех регистрах памяти фиксируются: сумма измеренных значений  $\sum g_i$ ; сумма квадратов  $\sum g_i^2$ ; количество произведенных измерений  $n$ .

Среднее значение  $\bar{g}$  и дисперсия  $\sigma^2$  вычисляются с помощью накопленных в памяти значений согласно выражениям

$$\bar{g} = \frac{\sum g_i}{n}; \quad (2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum g_i^2 - \frac{(\sum g_i)^2}{n}}{n-1}}. \quad (3)$$

Программа вычисления  $g_i$  может быть усложнена для того, чтобы исключить фиксирование неверных значений  $g_i$  (промахов), которые могут иметь место при измерениях. Для этого в память ЭКМ закладываются пределы допустимых значений  $g_i$ , при выходе за которые происходит переполнение разрядной сетки машин. Эти ошибочные значения не вводятся в регистры накопления  $\sum g_i$ ;  $\sum g_i^2$  и в регистр памяти числа произведенных измерений  $n$ .

Испытания макета устройства подтвердили правильность выбранной системы обработки результатов измерения ускорения силы тяжести.

II. ИЗМЕРЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Л.Д.БРИЗЖЕВ, Л.А.ГРАБОВСКАЯ,  
Л.Г.ГУТЕЛЬ

СХЕМА ХИМИИ ВЕСОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ПОСТОЯННОЙ ТЯГОТЕНИЯ

Схема весового метода определения постоянной тяготения предложена Л.Д.Брызжев. Наполненный ртутью резервуар (рис.1)

может перемещаться по вертикали из положения А в положение Б и обратно.

Ртуть, создающая эталонное гравитационное поле, вызывает изменение веса  $\Delta P$  и  $\Delta P^*$  измерительных шаров 2 и 6, которые подвешены на нитях к коромыслу 3 высокочувствительных равноплечих весов.

Измерение этой величины с требуемой точностью дает возможность определить

величину постоянной тяготения  $G = K_G (\Delta P + \Delta P^*)$ ,

где  $K_G$  - коэффициент, найденный расчетным путем.

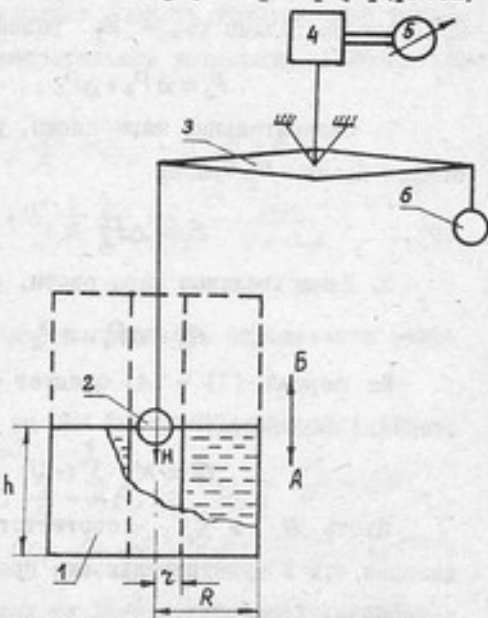


Рис.1. Схема весового метода определения постоянной тяготения

Измерить величину  $\Delta P' + \Delta P''$  в чистом виде нельзя, так как сила, вызывающая разбаланс весов при перемещении резервуара с ртутью из положения А в положение Б, равна

$$F_1 = \Delta P' + \Delta P'' + \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3, \quad (1)$$

где  $\Delta P_1$  - взаимодействие резервуара с измерительными шарами;

$\Delta P_2$  - взаимодействие резервуара с подвижной системой весов;

$\Delta P_3$  - взаимодействие ртутного тела с подвижной системой весов. Силы  $\Delta P_1$ ,  $\Delta P_2$ ,  $\Delta P_3$  нельзя исключить или рассчитать с необходимой точностью. Для определения их опытным путем необходимо провести дополнительные серии измерений:

1. Измерительные шары сняты, ртуть залита в резервуар. При этом разбаланс весов  $F_2$  равен

$$F_2 = \Delta P_3 + \Delta P_2. \quad (2)$$

2. Измерительные шары сняты, ртути в резервуаре нет, разбаланс весов  $F_3$  равен

$$F_3 = \Delta P_2. \quad (3)$$

3. Измерительные шары одеты, ртути в резервуаре нет:

$$F_4 = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (4)$$

Из формул (1) - (4) следует формула для определения постоянной тяготения:

$$G = K_G \cdot \sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} F_i. \quad (5)$$

Пусть  $n_i$  и  $S_i$  - соответственно показания системы индикации 4,5 и чувствительность при проведении  $i$ -той серии измерений. Тогда

$$F_i = \frac{n_i}{S_i}. \quad (6)$$

Используя материалы, приведенные в [2], несложно получить выражение для  $K_G$  в следующем виде:

$$K_G = [4\pi m (\rho_1 - \rho_2) (R - z - \sqrt{h^2 + R^2} + \sqrt{h^2 + z^2}) (1 + \Delta_{\text{ш}})]^{-1} \quad (7)$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  - плотность ртути и воздуха, соответственно,  $R$ ,  $z$  и  $h$  - геометрические размеры (см. рис. I);  $\Delta_{\text{ш}}$  - коэффициент, учитывающий влияние дальнего шара 6;  $m$  - масса измерительного шара 2.

Таким образом, формула измерения при определении постоянной тяготения весовым методом имеет следующий вид:

$$G = \frac{g \sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} \frac{R_i}{S_i}}{4\pi m (\rho_1 - \rho_2) (R - z - \sqrt{h^2 + R^2} + \sqrt{h^2 + z^2}) (1 + \Delta_{\text{ш}})} \quad (8)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения.

Анализ формулы (8) позволяет оценить требования к точности различных параметров измерительной установки. Действительно, из (8) следует, что

$$\begin{aligned} \delta_G = \delta_\gamma + \sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} [\delta_{R_i} - \delta_{S_i}] \frac{F_i}{F} - \delta_m - \delta_h \frac{h}{G} \frac{\partial G}{\partial h} - \\ - \frac{\delta_{\rho_1} - \rho_1/\rho_2 \cdot \delta_{\rho_2}}{1 - \rho_2/\rho_1} - \delta_R \frac{R}{G} \frac{\partial G}{\partial R} + \delta_z \frac{z}{G} \frac{\partial G}{\partial z} + \delta_{\Delta_{\text{ш}}} \cdot \frac{\Delta_{\text{ш}}}{1 + \Delta_{\text{ш}}} \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\delta_x = \delta$  - относительная погрешность определения величины  $x$ ;  $F = \sum_{i=1}^4 (-1)^{i-1} F_i$ .

Расчет, произведенный на ЭЕМ "Найри-К", показал, что в установке ХИНИМ

$$\begin{aligned} \frac{F_1}{F} \sim 1,7; \quad \frac{F_2}{F} \sim 0,6; \quad \frac{F_3}{F} \sim 0,1; \quad \frac{F_4}{F} \sim 0,01; \\ \frac{R}{G} \frac{\partial G}{\partial R} \sim 1,6; \quad \frac{z}{G} \frac{\partial G}{\partial z} \sim 0,14; \quad \frac{h}{G} \frac{\partial G}{\partial h} \sim 1,6; \quad \frac{\Delta_{\text{ш}}}{1 + \Delta_{\text{ш}}} \sim 0,005. \end{aligned}$$

Если  $\delta_G = 10^{-4}$ , а каждая из 16-и относительных погрешностей вносят в результат равный вклад  $\delta$ , то согласно закону квадратичного распределения погрешность  $\delta = \frac{\delta_G}{\sqrt{16}} = 0,25 \cdot 10^{-4}$ .

Из выражения (9) следует необходимая точность определения соответствующих величин, входящих в формулу измерения:

$$\begin{aligned} \delta_y &= \delta_m = \delta_p = 0,25 \cdot 10^{-5} & \delta_{n_2} &= \delta_{s_2} = 4,1 \cdot 10^{-5}; \\ \delta_{n_1} &= \delta_{s_1} = 1,6 \cdot 10^{-5}; & \delta_{n_3} &= \delta_{s_3} = 2,5 \cdot 10^{-4}; \\ \delta_{n_4} &= \delta_{s_4} = 2,5 \cdot 10^{-3}; & \delta_R &= \delta_A \approx 1,6 \cdot 10^{-5}; \\ \delta_z &= 1,8 \cdot 10^{-4}; & \delta_{\mu} &= 5 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

На ЭВМ "Наира-К" произведен расчет распределения напряженности гравитационного поля резервуара и ртути вдоль оси резервуара. По результатам расчета построен график (рис.2), из которого видно, что имеются точки ( $H = 6$  см и  $H = 56$  см), в

которых напряженность гравитационного поля резервуара равна нулю, а напряженность гравитационного поля ртутного цилиндра близка к максимальной. Если в процессе эксперимента размещать шар вблизи этих точек, то воздействием резервуара на измерительные шары можно пренебречь. Это позволит проводить только две серии измерений из четырех, определяя величины  $F_1$  и  $F_2$ . Таким образом, правильный выбор положения центра измерительного шара дает возможность вдвое уменьшить объем экспериментальных исследований. Из графика следует, что при этом

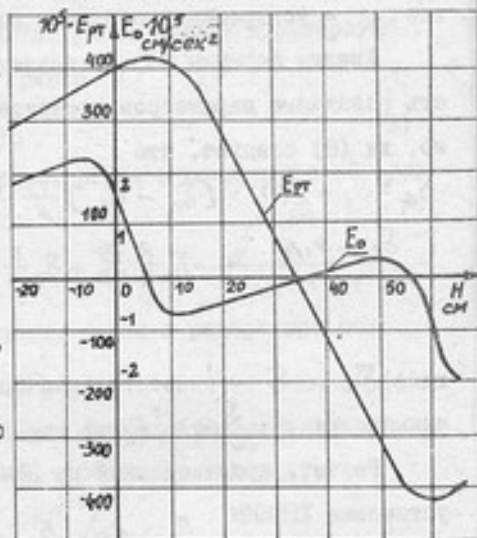


Рис.2. Графики распределения напряженностей гравитационного поля резервуара ( $E_0$ ) и ртути ( $E_{рт}$ ) вдоль оси резервуара

мерительного шара дает возможность вдвое уменьшить объем экспериментальных исследований. Из графика следует, что при этом

положение центра измерительного шара должно быть выдержано с точностью  $10^{-3}$  см. Эта величина существенно зависит от геометрических размеров резервуара и при соответствующем их выборе может быть значительно увеличена.

Приведенная схема измерения постоянной тяготения (проче она описана в литературе [ 1 ] ), позволяет ограничить - ся только одним резервуаром и исключить необходимость перекачивания ртути, но при этом несколько повышаются требования к точности геометрических размеров установки.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л.Д.Брижнев. Весовой метод определения гравитационной постоянной. В сб. "Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной", вып.8, Харьков, Изд-во ХТНИИМ, 1972, с. 217-226.

2. А.Г.Гугель. Исследование методов определения постоянной тяготения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Сборник рефератов НИР, 1975, № 6. Сер.02 . Физика, механика, 2, Теоретическая физика, с. II.

М.Г.ГУТЕЛЬ

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ХИНИИМ

В измерительной установке ХИНИИМ для определения постоянной тяготения весовым методом эталонное гравитационное поле создается ртутью, залитой в резервуар цилиндрической формы (рис.1).

В силу конструктивных особенностей установки на результат эксперимента влияет лишь вертикальная составляющая вектора напряженности эталонного поля, действующая на измерительный шар. Во время измерений резервуар с ртутью устанавливается таким образом, чтобы его ось  $Z$  была вертикальна. При этом вертикальная составляющая совпадает с продольной компонентой  $E_z$  вектора напряженности гравитационного поля ртути.

Используя материалы [1] и учитывая осевую симметрию

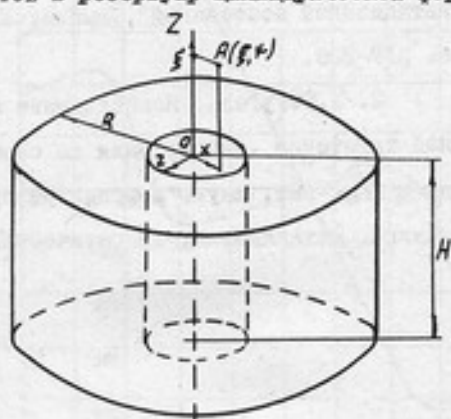


Рис.1.Ртутный резервуар измерительной установки ХИНИИМ



ртутного тела, несложно найти величину  $E_z$  в некоторой точке  $A(\xi, \eta)$ , лежащей вблизи оси резервуара:

$$E_z(\xi, \eta) = 2\pi\rho G \left[ e(\xi) + 0,25 \left( \frac{z^2 \eta^2}{Q^{0,5}(z, \xi)} - \frac{R^2 \eta^2}{Q^{0,5}(R, \xi)} \right) \right], \quad (1)$$

где  $Q(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$ ;

$$e(\xi) = Q(R, \xi) - Q(z, \xi) + Q(z, H + \xi) - Q(R, H + \xi);$$

$\rho$  - плотность ртути;  $G$  - постоянная тя-

готения.

$$\text{На оси } \eta=0 \text{ и } E_z(\xi, 0) = 2\pi\rho G e^*(\xi).$$

В случае сплошного цилиндра  $|z=0|$  имеем соответственно ! I !

$$E_z^*(\xi, 0) = 2\pi\rho G e^*(\xi), \quad (2)$$

где

$$e^*(\xi) = Q(R, \xi) - Q(R, H + \xi) + H + \xi - |\xi|. \quad (3)$$

Из формулы (3) непосредственно следует, что максимум достигается в плоскости оснований. У полого цилиндра  $|z \neq 0|$  распределение  $E_z(\xi)$  меняется существенным образом. Действительно,

$$\frac{\partial e}{\partial \xi} = \varphi(R) - \varphi(z),$$

$$\text{где } \varphi(z) = \frac{\xi}{Q(\eta, \xi)} - \frac{H + \xi}{Q(\eta, H + \xi)}.$$

Так как  $\varphi(0) = \varphi(\infty) = 0$  (в силу непрерывности) функция  $\varphi(z)$  имеет куполообразный характер при  $\xi > 0$ . При  $0 > \xi > -\frac{H}{2}$  кривая  $\varphi(z)$  не имеет экстремальных точек. Следовательно, поле внутри полого цилиндра такого же характера как и у сплошного. При  $\xi: \xi_0 > 0$

$$\frac{\partial e}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} = \varphi(R) - \varphi(z) = 0. \quad (4)$$

При заданных размерах  $|R, z, H|$  координату  $\xi_0$  можно найти с помощью численного решения на ЭВМ уравнения (4). Для каче -

ственного исследования несложно получить для  $\xi_0$  следующую оценку:

$$\xi_0 \approx 2 \left( 1 - \frac{H}{R} + 0,29 \frac{H^2}{R^2} \right).$$

В измерительной установке ХТНММ приняты следующие размеры:  $H = 48$  см,  $Z = 4,6$  см,  $R = 70,1$  см. При этом  $\xi_0 = 1,46$ .

По формуле (I) был произведен на ЭМ "Наври-К" расчет осевой компоненты напряженности эталонного гравитационного поля измерительной установки ХТНММ (рис.2). Он хорошо подтверждает

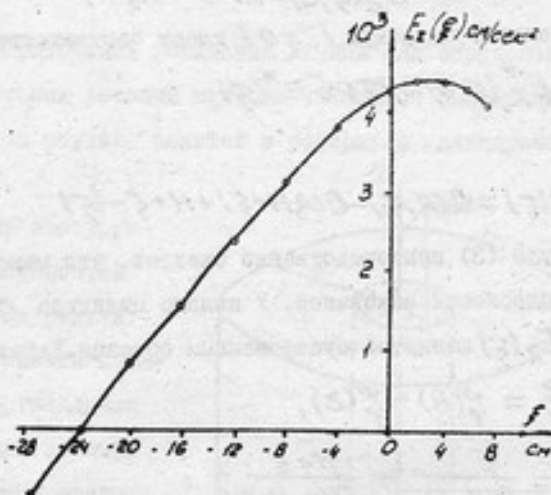


Рис.2. Распределение вертикальной составляющей гравитационного поля измерительной установки ХТНММ

ет полученные выше выводы о наличии экстремальной точки и величине соответствующего смещения максимума напряженности гравитационного поля.

Помещать центр измерительного шара вблизи точки  $\xi_0$  нельзя, так как любые вертикальные смещения измерительного

шара в процессе эксперимента смогут лишь ослабить воздействие на измерительный шар по сравнению с расчетом и приведут к систематической погрешности. Работа же на восходящей или на нисходящей ветви позволит придать этой погрешности случайный характер.

Рассмотрим влияние радиальных смещений центра измерительного шара относительно оси цилиндра. При  $\xi < z$  из формул (1,2) следует следующая оценка:

$$E_2(\xi) = E_2(\xi, 0) \sim 2\pi R G (\beta - \alpha) H \cdot \left[ 1 + 2 \left( 1 - \frac{t\beta^2 - 0,4\alpha^2}{\beta - \alpha} \right) \frac{\xi^2}{H} \right],$$

$$E_2(\xi, t) - E_2(\xi, 0) \sim 0,5\pi R G \left( 1 - \frac{\xi^2}{z^2} \right) \frac{t^2}{z},$$

где

$$\alpha = \frac{1}{0,4 + 1,92R/H}; \quad \beta = \frac{1}{0,96 + S \cdot z/H};$$

$$S = 1,36; \quad t = 0,68; \quad \xi^* = \xi \text{ при } \xi < z; \quad \xi^* = z \text{ при } \xi > z.$$

В нашем случае

$$\alpha = 0,34; \quad \beta = \begin{cases} 1,1 \text{ при } \xi < z; \\ 1,04 \text{ при } \xi > z. \end{cases}$$

Следовательно,

$$E_2(\xi) = \begin{cases} 77\pi R G (1 + 0,025 \xi^2/H) \text{ при } \xi < z; \\ 70\pi R G (1 - 0,615 \xi^2/H) \text{ при } \xi > z \end{cases} \quad (5)$$

и

$$\frac{|E_2(\xi, t) - E_2(\xi)|}{E_2(\xi)} \sim 1,43 \cdot 10^{-3} \left( 1 - \frac{\xi^2}{z^2} \right) t^2$$

Чтобы погрешность из-за радиального смещения не превышала заданной величины  $\sigma_y$ , необходимо при  $\xi \sim 0$  выполнить соотношение  $\psi < 0,84 \sqrt{10^3 \sigma_y}$ . Из формулы (5) следует, что допустимое вертикальное смещение  $h$  центра измерительного шара при заданной допустимой относительной погрешности  $\sigma_y$  равно  $h < 40 H \sigma_y$ . Отклонение оси цилиндра от вертикали на угол  $\theta$  приводит к появлению систематической погрешности, так как оно эквивалентно уменьшению  $E_2(\xi)$  на величину  $\Delta \theta$ :

$\Delta \theta = 0,5 \theta^2 E_2(\xi)$ . Следовательно, допустимое отклонение оси

цилиндра от вертикали  $\theta_g$  равно  $\theta_g < 1,41\sqrt{\sigma}$ .

К аналогичной погрешности приводит и некоаксиальность внутренней и наружной боковых поверхностей ртутного цилиндра.

Пусть  $\theta_z$  — отклонение от вертикали оси малого (радиуса  $z$ ), а  $\theta_R$  — большого (радиуса  $R$ ) цилиндра. Используя материалы, приведенные в [1], можно показать, что

$$\begin{aligned} E_R &\sim 2\pi\rho g(0,04 + 0,6H) \sim 3,6 \text{ см/см}^2; \\ E_z &\sim 2\pi\rho g(0,6z + 0,04H) \sim 5,4 \text{ см/см}^2, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $E_R$  — напряженность гравитационного поля сплошного цилиндра радиуса  $R$ , высотой  $H$  в центре одного из оснований при  $R > H$ ;  $E_z$  — аналогичная величина для малого цилиндра ( $z < H$ ).

Несоосность цилиндров приведет к появлению систематической погрешности:

$$\Delta_H = \frac{E_R}{E_R - E_z} \cdot \frac{H^2}{2} - \frac{E_z}{E_R - E_z} \cdot \frac{\theta_z^2}{2}$$

Из формулы (6) следует, что  $\Delta_H \sim 0,6\theta_R^2 - 0,1\theta_z^2$ .

Следовательно,  $\theta_{gR} < 1,3\sqrt{\sigma_{RH}}$ ;  $\theta_{gz} < 2,1\sqrt{\sigma_{zH}}$ , где  $\theta_{gR}$  и  $\theta_{gz}$  — допустимые отклонения осей большого и малого цилиндров от вертикали, а  $\sigma_{RH}$  и  $\sigma_{zH}$  — допустимые величины возникающих при этом систематических погрешностей.

В таблице приведены допустимые величины тех или иных отклонений в зависимости от  $\sigma$ .

Таблица

$\sigma$	$\gamma_{RH}$	$h_{RH}$	$\theta_g$	$\theta_{gR}$	$\theta_{gz}$
$10^{-4}$	2,7	1,9	50'	45'	1,8
$10^{-5}$	0,8	0,2	16'	14'	46'
$10^{-6}$	0,3	0,02	5'	4,5'	15'

В измерительной установке ХИНИИ несоборность наружной и внутренней боковых поверхностей резервуара составляет около 15'. Следовательно, если калировку производить по боковой наружной поверхности, то погрешностью из-за неконсаксальности можно пренебречь. Вообще же обеспечить требуемую точность определения постоянной тяготения можно лишь при выполнении соответствующих требований таблицы.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.Г.Гурель. Исследование методов определения постоянной тяготения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. Сборник рефератов НИР, 1975, № 6. Сер.02. Физика, механика, 2, Теоретическая физика, с.11.

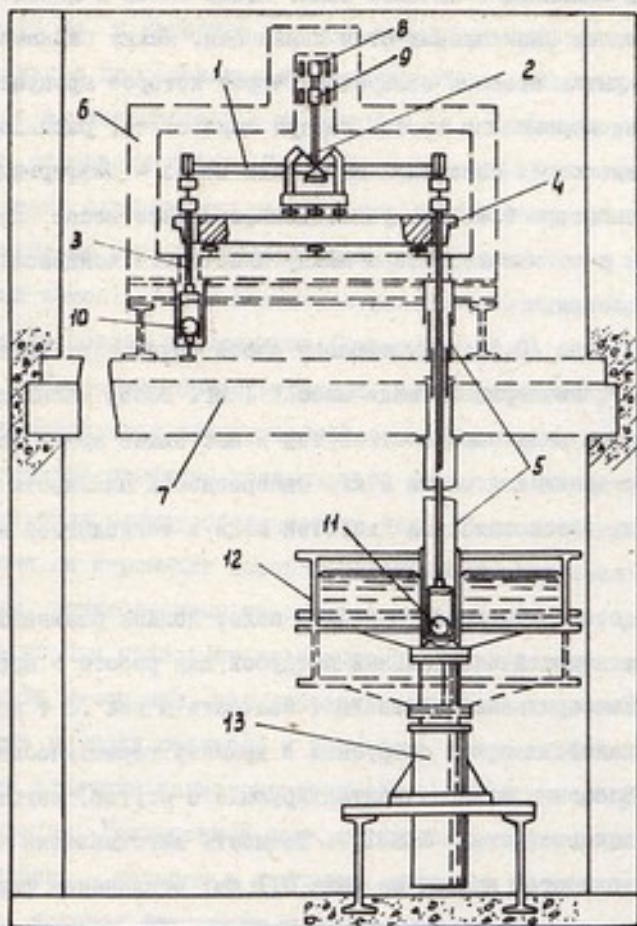
Ф.Г.БЕРКОВИЧ, Н.Х.ГЕРАСИМОВА,  
Л.А.ГРАБОВСКАЯ, Л.Г.ГУГЕЛЬ, Д.Н.УЗЕН

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОСТОЯННОГО ВЕСОВОГО МЕТОДОМ

Гравитационное взаимодействие измеряется на уравновешенных электромеханических весах при их нагрузке пробными шарами. Один из шаров при взвешивании находится в гравитационном поле ртути. Установка размещается в двух этажах подвального помещения: весы - на отметке 3,6 м, камера с ртутью - 7,2 м.

Коромысло весов I (см.рисунок) представляет собой кварцевую трубку длиной 1010 мм. Его опорой является упругий крестообразный шарнир 2. Подвесы весов 3,4 состоят из концевых упругих шарниров и грузоприемного устройства. Упругие шарниры весов, центральный и боковые, установлены на одном уровне. В конструкции грузоприемного устройства предусмотрено воздушное демпфирование подвесов. Длина правого подвеса около 2,5 м, левого - 0,5 м. Защитные кожухи 5 предохраняют подвесы от загрязнений и конвекции воздуха.

Весы оснащены приспособлениями для дистанционного измерения, нагрузки рейтерами, их калибровки, манипуляции пробными шарами и арретирования. Масса подвижной части весов составляет 4,5 кг. Весы расположены в термостате 6, который



Установка для определения гравитационной постоянной весовым методом

установлен на развязанной от пола панели 7. Термостат весов скреплен со стальным столом, привинченным к балкам и соединенным бетонной заливкой с панелью пола. Концы балок и панели замурованы в толще капитальных стен помещения. Между балками и панели перекрытия имеется отверстие, через которое пропущен подвес 4. Над коромыслом весов, внутри термостата, располагаются преобразователи положения коромысла весов — дифференциальные конденсаторы 8,9. Воздушное демпфирование весов осуществляется за счет малого зазора между пластинами конденсатора датчика положения.

Пробные тела 10,11 представляют собой точно изготовленные шары из окислородной меди массой 1 кг. Выбор массы шаров объясняется наивысшей достигнутой в настоящее время точностью взвешивания для массы 1 кг. Однородность плотности шаров по объему обеспечивается чистотой меди и технологией изготовления.

Ртуть, создающая гравитационное поле, должна размещаться в камере 12, имеющей центральный патрубок для работы с пробным шаром. Размеры камеры позволяют заливать в нее 10 т ртути. Места соединений камеры с патрубком и крышкой герметически уплотнены. Элементы камеры, контактирующие с ртутью, изготовлены из нержавеющей стали X18Ni9Ti. Точность изготовления внутренних поверхностей камеры не хуже 0,1 мм, отклонение формы патрубка от цилиндрической не более 0,02 мм. Для перемещения камеры с ртутью служит гидроподъемник 13. Нижнее и верхнее положения гидроподъемника фиксированные, высота перемещения около 0,5 м, время перемещения 1,5 мин.

Схема индикации основана на преобразовании угла наклона



весов в электрические сигналы. Индикация осуществляется частотным и фазовым методами. Частотный метод позволяет производить измерения в широком диапазоне нагрузок, фазовый — работать в узком диапазоне с большим разрешением вблизи положения равновесия. В качестве датчика положения равновесия весов используется дифференциальный конденсатор, средняя пластина которого жестко связана с коромыслом, а неподвижные установлены на основании весов. При отклонении коромысла изменяется зазор между пластинами, контуры перестраиваются и это приводит к изменению частоты генераторов, которые входят в контуры (частотный метод), или к появлению фазового сдвига между напряжениями на каждом из контуров (фазовый метод).

Главное изменение нагрузки, регулирование чувствительности производится электростатически. При подаче напряжения на неподвижные пластины конденсатора на подвижную пластину действует сила электростатического поля. Подвижная пластина укреплена на коромысле весов и перемещается параллельно неподвижным, установленным на основании весов. Схема управления и сигнализации позволяет дистанционно с пульта управления производить измерения, регулировать положение коромысла, осуществлять навеску рејтеров и управлять гидроподъемником. Изменяемые величины регистрируются цифропечатающим устройством или самописцем. Реверсивный привод гидроподъемника управляется дистанционно — мотором к масляному насосу и мотором затвора колонки, которая фиксирует положение камеры. Автоматическое отключение моторов в крайних положениях обеспечивается блокировочными контактами.

В разработанной установке сила гравитационного взаимодействия между пробным шаром и 10-тонным ртутным цилиндром

составляет  $\pm 0,15$  дин. Весы имеют механическую чувствительность  $2 - 5 \cdot 10^{-6}$  рад/дин. Индикатор равновесия весов позволяет обнаруживать изменение нагрузки весов  $1 \cdot 10^{-5}$  дин, что при нагрузке шаром массой 1 кг составляет  $1 \cdot 10^{-11}$  в относительном выражении.

При взвешивании на электромеханических весах большие отклонения коромысла от начального положения компенсируются весом калиброванного рейтера, а оставшиеся малые измеряются по электрическому сигналу. При изменении положения камеры достигается удвоение величины гравитационного взаимодействия.

Выполнение измерений гравитационной постоянной непосредственно вытекает из методики проведения эксперимента и способа измерения гравитационного взаимодействия на весах. Анализ, проведенный в литературе [1], показывает необходимость учета взаимодействия гравитационного поля ртути с подвижными элементами весов, а также взаимодействия гравитационного поля камеры с пробными шарами и подвижными элементами весов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Брызжев Л.Д., Грабовская Л.А., Гугель Г.Л. Схема ХГНИМ весового метода определения постоянной тяготения. Статья в этом сборнике.

Ф.Г.БЕРКОВИЧ, Л.А.ГРАВОВСКАЯ

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВ

Приведены результаты исследования весов установки для определения гравитационной постоянной [1]. Коромысло весов нагружено килограммовыми массами, изменение нагрузки составляет примерно 0,3 мг. При измерениях изменения нагрузки большие отклонения коромысла компенсируются весом калиброванного по массе рейтера, а оставшиеся малые регистрируются электронной системой индикации. В зависимости от настройки весов период собственных колебаний коромысла составляет 50-150 с. Исследования проводятся при успокоении весов, близком к критическому. Время между измерениями при смене нагрузки около 5 мин. Чувствительность весов определяется по изменению частоты генератора при помощи калиброванного рейтера. При этом она достигает  $1-3 \cdot 10^{-6}$  рад/мкг, что соответствует эффективной чувствительности весов с электронной системой индикации 50-150 Гц/мкг. Дрейф весов определяется в основном нестабильностью температуры. Его температурный коэффициент составляет 200 мкг/°С. Скорость дрейфа доходила до 1 мкг в минуту.

В результате воздействия микросейсмиков на выходе индикатора весов наблюдается шумовой сигнал, представляющий собой

влияние вибраций на показания весов. Величина этого сигнала существенно зависит от времени суток: ночью он эквивалентен нагрузке 0,3 - 3 мкг, днем - 10 мкг. Микросейсмы измерялись сейсмометром Голицына на плите, где размещена камера с весами. Уровень вибрационного фона днем порядка 10 мкм, ночью - до 1 мкм при частотах вибраций от 0,2 до 25 Гц.

Таким образом, существует прямая зависимость рассеяния показаний весов от величины вибрационных помех. Следует отметить, что в ночное время наблюдались кратковременные (2-3 мин) состояния относительного покоя весов. При этом рассеяние показаний до 20-30 точек измерения дрейфа весов не выходит за пределы 0,05 мкг (рис.1).

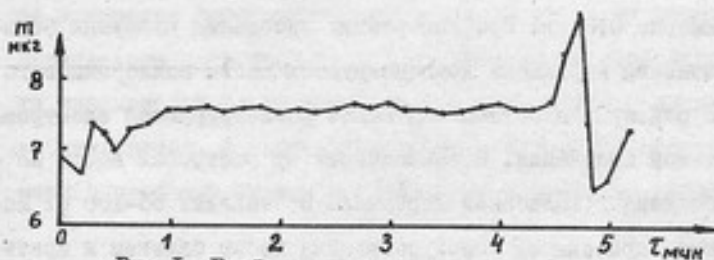


Рис.1. График дрейфа весов

Иногда во время наблюдений имели место переходы весов к новому положению равновесия, соответствующему изменению нагрузки от 5 до 45 мкг. Переходы происходили скачком в течение 40-70 с. (рис.2). Непостоянство показаний, соответствующих одному и тому же значению измеряемой нагрузки, определялось после кратковременного разбаланса весов малой нагрузкой. Отмечено, что невозвращение весов к исходному положению равновесия зависит от величины разбаланса (рис.3). При изменении нагрузки на 150 мкг отклонение от нулевого положения

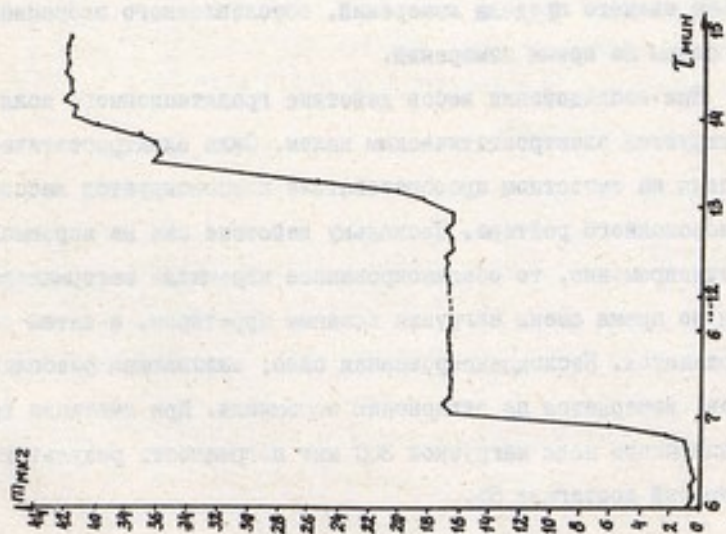


Рис. 2. Переходы весов из одного положения равновесия в другое

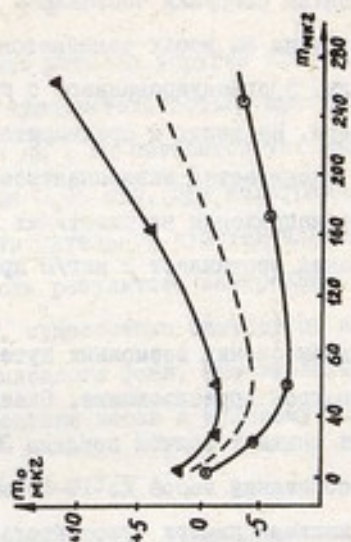


Рис. 3. Нецовращение весов к исходному положению после подачи нагрузки:

▲ - на левое плечо коромысла;

○ - на правое плечо коромысла

после снятия нагрузки составляет около 5 мкг. В этих измерениях нагрузка на весах изменяется при помощи емкостного датчика силы, проградуированного с помощью калиброванного по массе рейтера. На весах с предварительно измеренной чувствительностью оценивается эквивалентное значение нагрузки в зависимости от напряжения на пластинах конденсатора. Крутизна преобразования составляет 3 мкг/В при полиризуемом напряжении 100 В.

Для выяснения возможных путей усовершенствования весов исследовалось арретирование. Оказалось, что арретир при отпуске создает толчок порядка 300 мкг, что приводит к рассеянию показаний весов до 10–15 мкг. Делалась попытка определить наличие порога чувствительности весов: отмечалась наименьшая нагрузка, которую еще позволяла зарегистрировать система индикация. Порог чувствительности, если он имеется, меньше нижнего предела измерений, обусловленного вибрационным фоном во время измерений.

При исследовании весов действие гравитационного поля имитируется электростатическим полем. Сила электростатического поля на емкостном преобразователе компенсируется массой калиброванного рейтера. Поскольку действие сил на коромысло не одновременно, то сбалансированное коромысло затормаживается во время смены нагрузки плавным арретиром, а затем освобождается. Нескомпенсированная сила, вызывающая разбаланс весов, измеряется по отклонению коромысла. При имитации гравитационного поля нагрузкой 300 мкг погрешность результата измерений достигает 5%.

## Выводы

Исследование показало, что весы на упругом крестообразном шарнире обладают высокой чувствительностью, при реализации которой изменение частоты на 1 Гц соответствует изменению нагрузки приблизительно на 0,01 мкг. При килограммовой нагрузке это соответствует относительной чувствительности весов  $1 \cdot 10^{-11}$ . Однако погрешность результата измерений, достигающая до 5% (т.е. до 15 мкг), существенно зависит от нестабильности температуры, вибрационного фона, значительный вклад в погрешность вносит невозвращение весов к нулевому положению.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Беркович Ф.Г., Герасимова Н.Х., Грабовская Л.А., Гугель Л.Г., Улезко Д.Н. Установка для определения гравитационной постоянной весовым методом. Статья в этом сборнике.

РЕЗЮМЕ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 528.27:528.56

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

ЗАДАЧИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В ОБЛАСТИ  
ГРАВИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

В.П.БОНДАРЕНКО, С.С.БОНДАРЕВ,  
В.Н.БРЕНЕР, В.Н.ДУДАРЧИК

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227 (287) . 1977 г., с. 4-7.

Рассмотрены вопросы обеспечения достоверности и единства измерений в области гравиметрии с использованием абсолютных баллистических гравиметров в качестве эталонных и образцовых средств измерений.

СТАЦИОНАРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ АБСОЛЮТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

В.В.БЕЗРОДНЫЙ, В.Н.ДУДАРЧИК,  
В.Д.КРАСОВСКИЙ, И.Г.ЖУЛИЧЕВА, А.К.СУРКОВ

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227 (287) . 1977 г., с. 8-11.

Авторы делятся опытом построения стационарной установки для абсолютных определений ускорения силы тяжести несимметричным способом, построенной и испытанной в ХУНВИМ. Илл. 2.



## ВЫСОКОТОЧНЫЙ АБСОЛЮТНЫЙ ГРАВИМЕТР

Б.Н.ПЕВЗNER, В.А.РОМАНУК

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227 (287), 1977 г., с. 12-16.

Дано краткое описание макета высокоточного абсолютного гравиметра, разработанного и изготовленного в Институте физики Земли АН СССР в течение 1967-1975 гг., основанного на симметричном баллистическом методе одной станции. Илл. 3, обл. 7.

## СИММЕТРИЧНЫЙ МЕТОД АБСОЛЮТНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКГ

В.В.АРБЕННИН, В.Н.БРЕНЕР,  
Ю.Д.БРОДСКИЙ

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227 (287), 1977 г., с. 17-21.

Описан симметричный метод абсолютного определения ускорения силы тяжести с использованием оптического квантового генератора в качестве эталона длины и пути повышения точности измерения. Илл. 2.

## МЕХАНИЧЕСКОЕ УЗЛЫ БАЛЛИСТИЧЕСКИХ ГРАВИМЕТРОВ

С.И.ВИКАРИИ, Н.С.ИВАНОВ

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227 (287), 1977 г., с. 22-25.

Описаны принципы построения механических узлов баллистических гравиметров, используемых в ХИНИИМ, и дан качественный анализ преимуществ каждого баллистического блока.

НАХОЖДЕНИЕ НЕСМЕЩЕННОЙ ОЦЕНКИ ВЕЛИЧИНЫ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

С.С.БОНДАРЬЕВ, В.Н.БРЕНЕР, Ю.Д.СМЕЛЯНСКИЙ

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287) , 1977 г., с. 26-30.

Описан способ обработки результатов гравиметровых измерений в условиях сильных возмущений с использованием методов выделения "скрытых периодичностей". Илл.3, библи.3.

ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ДЛИННОПЕРИОДНОГО ДИНАМИЧЕСКОГО  
ГАСИТЕЛЯ КОЛЕБАНИЙ НА МАГНИТНОЙ ПОДВЕСКЕ

В.Д.ШУРУЕКИН

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287) , 1977 г., с. 31-35.

Рассмотрен принцип осуществления длиннопериодного гасителя колебаний на магнитной подвеске с системой параметрической стабилизации жесткости подвески для получения длиннопериодных изохронных колебаний взвешенной инерционной массы. Илл.3.

ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПУТИ В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ГРАВИМЕТРЕ

В.В.АРБЕНИН, Е.М.ЗАНИМОНСКИЙ,  
М.В.ЗОЛОЧЕВСКИЙ, И.Л.РАЧИНСКИЙ

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287) , 1977 г., с. 36-40.

Описано устройство оптической части лазерного измерителя пути и времени для абсолютных баллистических гравиметров и дан краткий анализ возможностей повышения точности измерений и улучшения технологичности построения источника света.Илл.2, библи.3.

ВКЛАД КВАДРАТИЧНЫХ ЭФФЕКТОВ И ФЛУКТУАЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ  
В ПОГРЕШНОСТЬ ГРАВИМЕТРА

Е.М.ЗАНИМОНСКИИ, О.Н.МИРОШНИЧЕНКО,  
С.М.ОХОТИНА

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып.227(287), 1977 г., с. 41-44.

Описана методика вычисления вкладов квадратичных эффектов и флуктуаций длины волны лазера в погрешность баллистического гравиметра, приведены примеры расчетов и даны рекомендации по оптимизации геометрии интерферометра.

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ  
УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

В.Н.БРЕНЕР, В.Г.МЕДРЕВ, В.А.ПЕТИК,  
В.П.ХОДЖАЕВ, И.Я.ХАСКИН

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287), 1977 г., с. 45-48.

Описано устройство обработки результатов, выполненное на основе серийно выпускаемой настольной электронно-клавишной вычислительной машины типа "Искра-123" с автоматическим вводом данных по электрическим каналам. Илл.1.

УДК 528.27

ИЗМЕРЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

СХЕМА ДЛИННЫМ ВЕСОВОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОСТОЯННОЙ  
ТЯГОТЕНИЯ

А.Д.БЕЗЫЗЬЕВ, Л.А.ГРАБОВСКАЯ,  
А.Г.ГУТЕЛЬ

Труды метрологических институтов СССР.Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287), 1977 г., с. 49-53.

В статье приведены описание метода и анализ формулы измерений при определении постоянной тяготения весовым методом ХНИИМ. Илл.2, библ.2.

#### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ХНИИМ

Л.Г.ГУТЕЛЬ

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287), 1977 г., с. 54-59.

Проведено исследование гравитационного поля и определены требования к точности геометрических размеров установки ХНИИМ для определения постоянной тяготения. Илл. I, библ. I.

#### УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ ВЕСОВЫМ МЕТОДОМ

Ф.Г.БЕРКОВИЧ, Н.Х.ГЕРАСИМОВА,  
Л.А.ГРАБОВСКАЯ, Л.Г.ГУТЕЛЬ, Д.Н.УЛЕЗКО

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускорения силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287), 1977 г., с. 60-64.

Описана установка для определения постоянной тяготения. Индикация нагрузки осуществляется по частоте генератора, определяемой емкостным преобразователем. Изменение частоты на 1 Гц соответствует изменению нагрузки приблизительно на  $1 \cdot 10^{-5}$  дин. Источником гравитационного поля является ртутный цилиндр массой в 10 т. Сила взаимодействия с пробным шаром массой 1 кг соответствует нагрузке в  $\pm 0,15$  дин. Величина гравитационной постоянной определяется по формуле измерения через известные геометрические параметры установки и измеренную силу. Илл. I, библ. I.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕСОВ

Ф.Г.БЕРКОВИЧ, Л.А.ТРАВОВСКАЯ

Труды метрологических институтов СССР. Измерение ускоренной силы тяжести и гравитационной постоянной, вып. 227(287), 1977 г., с. 65-69.

Приведены результаты исследования весов установки для определения гравитационной постоянной. Коромысло нагружено килограммовыми массами, изменение нагрузки составляет примерно 0,3 мг. Чувствительность весов 50-150 Гц/мкг. Исследовано влияние на показания весов температуры, уровня вибраций. Отмечено явление невозвращения весов к нулевому положению. Абсолютная погрешность результата измерений не превышает 15 мкг. Илл. 3, табл. I.

## СО Д Е Р Ж А Н И Е

Предисловие . . . . .	3
-----------------------	---

### Измерение ускорения силы тяжести

1. В.П.Бондаренко, С.С.Бондарев, В.Н.Бренер, В.Н.Дударчик. Задачи метрологического обеспечения в области гравиметрических измерений . . . . .	4
2. В.В.Безродный, В.Н.Дударчик, В.Д.Красовский, И.Г.Ляличева, А.К.Сурков. Стационарная установка для абсолютных измерений ускорения силы тяжести . . . . .	8
3. Б.Н.Певзнер, В.А.Романик. Высокоточный абсолютный гравиметр . . . . .	12
4. В.В.Арбенин, В.Н.Бренер, Ю.Д.Бродский. Симметричный метод абсолютного определения ускорения силы тяжести с использованием ОКГ . . . . .	17
5. С.И.Викарий, Н.С.Иванов. Механические узлы баллистических гравиметров . . . . .	22
6. С.С.Бондарев, В.Н.Бренер, Ю.Л.Смелянский. Нахождение несмещенной оценки величины ускорения силы тяжести в условиях сильных возмущений . . . . .	26
7. В.Д.Шурубкин. Принцип построения явинопериодного динамического гасителя колебаний на магнитной подвеске . . . . .	31
8. В.В.Арбенин, Е.М.Занимонский, М.В.Золочевский, И.Л.Рачинский. Лазерный измеритель пути в баллистическом гравиметре . . . . .	36

9. Е.М.Занимонский, О.Н.Мирошниченко, С.М.Охотина. Вклад квадратичных эффектов и флуктуаций длины волны в погрешность гравиметра . . . . .	41
10. В.Н.Бренер, В.Г.Медреш, В.А.Петик, В.П.Ходжа- ев, И.Я.Хаскин. Устройство для обработки результатов из- мерений ускорения силы тяжести . . . . .	45

Измерение гравитационной постоянной

11. Л.Д.Брызжев, Л.А.Грабовская, Л.Г.Гугель. Схема XIIИИМ весового метода определения постоянной тяготения	49
12. Л.Г.Гугель. Теоретическое исследование гравита- ционного поля измерительной установки XIIИИМ . . . . .	54
13. Ф.Г.Беркович, Н.Х.Герасимова, Л.А.Грабовская, Л.Г.Гугель, Д.Н.Улезко. Установка для определения гравита- ционной постоянной весовым методом . . . . .	60
14. Ф.Г.Беркович, Л.А.Грабовская. Экспериментальное исследование весов . . . . .	65

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ  
СИЛЫ ТЯЖЕСТИ И ГРАВИТАЦИОННОЙ ПОСТОЯННОЙ

Выпуск 227(287)

Редактор Э.И.Литвина

Корректор Л.Д.Камшанова

Ответственный за выпуск канд.физ.-мат.наук

С.С.Бендарев

---

М - 21780 . Подписано в печать 19.IX-1977 г. Формат 60x90/16  
3 печ.л. Уч.изд. 2,75. Тираж 400 экз. Цена 24 коп.Зак.№204

---

Отпечатано на ротаприте ХИНИИМ  
г. Харьков, 78, ул. Дзержинского, 40 .



