

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА | 8 |
| 1.1. Предмет и задачи гравиметрии | 8 |
| 1.2. Распределение силы тяжести на поверхности эллипсоида вращения..... | 11 |
| 1.3. Аномалии силы тяжести | 16 |
| 1.4. Уклонение отвеса..... | 18 |
| 1.5. Гравиметрические данные в задачах инженерной геодезии..... | 27 |
| 1.5.1. Поправка в измеренное горизонтальное направление | 28 |
| 1.5.2. Поправка в зенитное расстояние | 29 |
| 1.5.3. Влияние уклонения отвеса на измеряемое расстояние | 30 |
| 1.5.4. Влияние уклонения отвеса на результаты тригоно- метрического и геометрического нивелирования | 31 |
| 1.5.5. Редуцирование азимута в шахту..... | 32 |
| 2. УСТРОЙСТВО ГРАВИМЕТРА..... | 35 |
| 2.1. Кварцевая упругая система..... | 41 |
| 2.2. Система нивелирования | 44 |
| 2.3. Электрическая система | 45 |
| 2.4. Оптическая система..... | 46 |
| 2.5. Измерительная система..... | 47 |
| 2.6. Диапазонная система..... | 48 |
| 2.7. Вакуумное устройство | 49 |
| 2.8. Термостатирование гравиметра | 50 |
| 3. ПОВЕРКИ И ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАВИМЕТРОВ..... | 53 |
| 3.1. Настройка гравиметра на минимум чувствительности к на- клону по уровням..... | 54 |
| 3.1.1. Первый способ настройки уровней | 57 |
| 3.1.2. Второй способ настройки уровней | 61 |
| 3.1.3. Третий способ настройки уровней | 62 |
| 3.2. Определение масштабного коэффициента гравиметра..... | 63 |

| | |
|---|-----|
| 3.3. Определение цены оборота диапазонного винта | 68 |
| 3.4. Определение коэффициента смещения нуля-пункта гравиметра..... | 68 |
| 3.4.1. Аналитический способ..... | 69 |
| 3.4.2. Графический способ..... | 70 |
| 3.5. Определение чувствительности и порога чувствительности гравиметра | 71 |
| 3.6. Определение времени переходного процесса или становления отсчета..... | 73 |
| 3.7. Определение верхнего предела измерений силы тяжести без перестройки диапазона гравиметра | 74 |
| 3.8. Исключение влияния люфта («мертвого хода») измерительного винта | 75 |
| 3.9. Определение температурного коэффициента гравиметра | 75 |
| 3.10. Определение барометрического коэффициента гравиметра | 76 |
| 4. МЕТОДИКА ГРАВИМЕТРОВЫХ РАБОТ..... | 78 |
| 4.1. Методы измерения силы тяжести | 78 |
| 4.2. Виды гравиметрических съемок | 82 |
| 4.3. Геодезическое обеспечение гравиметрических съемок | 83 |
| 4.4. Выполнение гравиметрических измерений | 84 |
| 4.4.1. Опорная гравиметрическая сеть | 84 |
| 4.4.2. Рядовая сеть | 88 |
| 4.5. Обработка результатов гравиметровых измерений и оценка их точности..... | 92 |
| 5. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ | 94 |
| Лабораторная работа № 1. Исследование гравиметра типа ГНУ-КВ | 94 |
| Лабораторная работа № 2. Обработка гравиметрического рейса | 108 |
| Лабораторная работа № 3. Вычисление поправок за приливное влияние Луны и Солнца | 115 |
| Лабораторная работа № 4. Оценка точности гравиметрической связи..... | 124 |
| Лабораторная работа № 5. Вычисление аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе..... | 131 |
| Лабораторная работа № 6. Построение гравиметрических карт аномалий силы тяжести с редукциями Буге и в свободном воздухе | 136 |

| | |
|--|-----|
| Лабораторная работа № 7. Вычисление составляющих уклонения отвеса в плоскости меридиана (ξ), первого вертикала (η) и высоты квазигеоида (ζ) | 146 |
| Лабораторная работа № 8. Определение фундаментальных геодезических постоянных по гравиметрическим данным | 154 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 163 |
| Приложение 1. Астрономические данные для выполнения лабораторных работ | 166 |
| Приложение 2. Образец заполнения таблицы результатов исследования уровней | 167 |
| Приложение 3. Образец для заполнения гравиметрического журнала..... | 168 |
| Приложение 4. Исходные данные для выполнения лабораторной работы № 2 | 169 |
| Приложение 5. Форма для заполнения таблицы обработки гравиметрических измерений..... | 171 |
| Приложение 6. Исходные данные для выполнения лабораторной работы № 4 | 172 |
| Приложение 7. Исходные данные для выполнения лабораторных работ № 5, 8..... | 175 |
| Приложение 8. Нормальные значения силы тяжести γ_0 мГал..... | 182 |
| Приложение 9. Исходные данные для выполнения лабораторной работы № 6 | 185 |
| Приложение 10. Образец гравиметрической карты | 187 |
| Приложение 11. Образцы схем для выполнения лабораторной работы № 7..... | 188 |
| Приложение 12. Пример выполнения лабораторной работы № 7 | 190 |
| Приложение 13. Требования к точности планово-высотного обособования гравиметрических съемок..... | 192 |

ВВЕДЕНИЕ

Гравиметрические данные используются во многих сферах деятельности человека, как научных, так и практических. Так, например, на связи формы поверхности Земли с элементами гравитационного поля основан физический метод определения фигуры нашей планеты.

Решение редуцированной задачи высшей геодезии, определение геодезических координат, высот практически невозможно без знания величин уклонения отвеса и аномалий высот, которые определяются по гравиметрическим данным.

Результаты измерения силы тяжести на поверхность Земли и фиксация ее изменения во времени позволяют изучать внутреннее строение Земли, определять ее физические параметры.

Все явления, происходящие на поверхности Земли, связаны с перемещением масс внутри нее. Эти явления можно фиксировать при постоянном мониторинге гравитационного поля в тектонически активных областях и тем самым делать прогноз возможных землетрясений или извержений вулканов.

Повышение требований к точности расчета орбит искусственных спутников Земли увеличивает значимость гравиметрических данных, которые используются для целей автономной навигации. Незнание особенностей гравитационного поля порождает погрешности в показаниях инерциальных навигационных систем и определении координат точек земной поверхности.

Строительство уникальных объектов народного хозяйства, таких, как ускорители частиц, антенны радиотелескопов, телебашни, прокладка протяженных подземных коммуникаций, требующих выполнения монтажных работ с относительной погрешностью не ниже $1 \cdot 10^{-6}$, невозможны без

учета неоднородностей гравитационного поля, с которыми связано положение отвесных линий.

Высокоточные гравиметрические измерения проводятся на геодинамических полигонах для мониторинга геологических процессов в тектонически активных областях, а также на месторождениях углеводородного сырья для контроля за ходом эксплуатации скважин. Постоянный контроль за характером изменения гравитационного поля помогает выявить и изучить величину деформаций земной поверхности в объеме: фиксировать и предотвращать осадки и смещения дорогостоящих инженерных сооружений, к которым относятся и эксплуатационные колонны скважин.

Знание значений ускорения силы тяжести необходимо и в метрологии – для воспроизводства ряда физических величин (силы, давления, силы тока и др.).

В данном учебном пособии кратко изложены вопросы теории гравитационного метода, устройства, поверок и исследования гравиметров, методики проведения гравиметрических измерений на местности, их последующей обработки, оценки точности, вычисления аномалий силы тяжести и построения гравиметрических карт. Приведена методика вычисления уклонов отвесной линии и аномалии высоты.

Издание предназначено для выполнения лабораторно-практических работ и подготовки к зачету по дисциплине «Геодезическая гравиметрия».

Автор выражает благодарность инженерам кафедры астрономии и гравиметрии Д.Н. Голдобину и Т.И. Гороховой за техническую помощь в подготовке издания.

1. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ МЕТОДА

1.1. Предмет и задачи гравиметрии

Гравиметрия – раздел геофизики – наука об измерении и изучении распределения силы тяжести и ее составляющих на земной поверхности [12, 33, 35].

В предмет «Гравиметрия» входят вопросы использования результатов измерения силы тяжести для определения фигуры Земли и ее внутреннего строения, а также для изучения геологического строения ее верхних слоев: земной коры и мантии [4, 7, 8, 11, 12, 25, 27, 31, 38].

Задачей гравиметрии является определение гравитационного поля Земли и других небесных тел как функции местоположения и времени по измерениям силы тяжести и гравитационных градиентов на поверхности тела или вблизи него.

Начало экспериментальному изучению силы взаимодействия между Землей и физическими телами было положено итальянским ученым Галилео Галилеем (1564–1642), который в 1590 г. определил, на основе закона равноускоренного движения свободно падающего тела, численное значение силы притяжения, приблизительно равное 10 м/с^2 .

Теоретическое обоснование явления притяжения между телами сделал английский физик и математик Исаак Ньютон (1642–1717), который вывел закон всемирного тяготения:

$$F = f \cdot \frac{m_1 \times m_2}{r^2}, \text{ Н}, \quad (1.1)$$

где m_1 и m_2 – массы притягиваемых тел, кг;

r – расстояние между телами, м;

f – гравитационная постоянная, или коэффициент пропорциональности между левой и правой частями формулы, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

Закон всемирного тяготения Ньютона является теоретической основой гравиметрии. Численное значение f первым определил в 1789 г.

английский физик Г. Кавендиш (1731–1810) с помощью усовершенствованных им крутильных весов конструкции Дж. Мичела (1724–1793).

Значение f получилось равным $(6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$. В настоящее время значение f равно $(6,67259 \pm 0,00085) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$.

Значение гравитационной постоянной не зависит ни от физических или химических свойств обеих масс, ни от величины и направления скорости их движения, ни от свойств среды, разделяющей эти тела. Она зависит только от выбранной системы измерения единиц массы, длины и времени.

Сила тяжести – сила, с которой все тела притягиваются Землей. Для шарообразной Земли с массой M и радиусом \bar{R} однородной по плотности сила притяжения определяется по формуле:

$$\bar{F} = \frac{fM}{R^2}. \quad (1.2)$$

Вектор силы притяжения \bar{F} направлен к центру Земли.

На точечную массу находящуюся на поверхности реальной Земли, вращающейся вокруг своей оси со скоростью ω (рис. 1.1), кроме силы ньютоновского тяготения действует центробежная сила \bar{C} и сила притяжения небесных тел \bar{F}_n . Центробежная сила вычисляется по формуле:

$$C = \omega^2 \rho, \quad (1.3)$$

где ρ – расстояние точки N от оси вращения Земли;

ω – угловая скорость вращения Земли;

Равнодействующей этих сил является сила тяжести \bar{G} . В каждой точке земной поверхности с единичной массой ($m = 1$) существует единственный вектор силы тяжести. Совокупность векторов \bar{G} образует поле силы тяжести – гравитационное поле. Или, другими словами, гравитационным полем называется пространство, в котором проявляются силы тяготения. Направление отвесной линии в пространстве совпа-

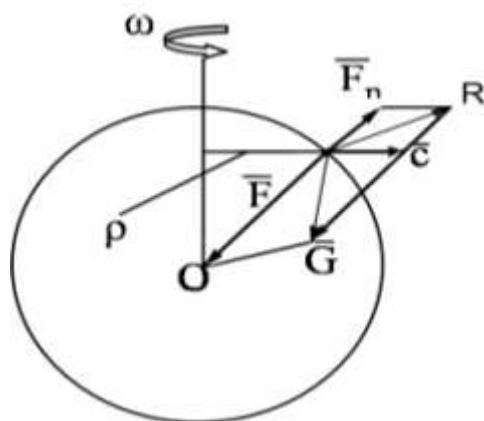


Рис. 1.1. Силы, действующие на точку физической поверхности Земли

дает с вектором силы тяжести.

Размерность силы тяжести $\dim G = L \cdot M \cdot T^{-2}$, где L – длина (м), M – масса (кг), T – время (с).

Единицей измерения силы тяжести в СИ является 1 Ньютон = 1 кг · м/с².

Сила притяжения, действующая на единичную массу, есть напряженность поля силы тяжести, численно равная ускорению g , сообщаемому этой массе.

Размерность ускорения силы тяжести в СИ:

$$\dim g = L \cdot T^{-2},$$

где L – длина (м); T – время (с).

Единица измерения ускорения силы тяжести в СИ – м/с².

Это очень большая величина. Для Земли ее среднее значение составляет $\bar{g} = 9,81$ м/с².

В гравиметрии за единицу ускорения силы тяжести принят 1 Гал – в честь Г. Галилея:

$$1 \text{ Гал} = 1 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2 - \text{гал};$$

$$1 \text{ мГал} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2 - \text{миллигал};$$

$$1 \text{ мкГал} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}^2 - \text{микрогал}.$$

Для определения \bar{g} в любой точке пространства необходимо знать три ее составляющие по осям прямоугольных координат: g_x, g_y, g_z , и угол между направлением \bar{g} и осями координат, т. е. углы $\angle g, X$; $\angle g, Y$; $\angle g, Z$.

В 1773 г. Ж. Лагранж (1736–1813) предложил использовать скалярную функцию $W(x,y,z)$, частные производные которой по осям координат равны проекциям \bar{g} на эти оси:

$$\frac{\partial W}{\partial X} = g_x; \quad \frac{\partial W}{\partial Y} = g_y; \quad \frac{\partial W}{\partial Z} = g_z.$$

К. Гаусс (1777–1855), крупнейший немецкий математик, назвал эту функцию потенциалом:

$$W = f \int \frac{dm}{r} + \frac{w^2}{2} (X^2 + Y^2) \quad (1.4)$$

Первое слагаемое этого выражения – потенциал тяготения V , а второе – потенциал центробежной силы Q :

$$W = V + Q.$$

Физический смысл потенциала – это работа в поле тяготения по перемещению единичной массы из бесконечности в данную точку:

$$W = g_s \cdot S \cdot \cos\left(\hat{\bar{g}}, S\right), \text{ м}^2/\text{с}^2. \quad (1.5)$$

При перемещении массы в направлении, перпендикулярном вектору силы тяжести имеем: $dW = g_s \cdot dS \cdot \cos 90^\circ$, $dW = 0$, т. е. в каждой точке пространства будем иметь поверхность одинакового потенциала $W = \text{const}$. В 1873 г. уровенную поверхность, близкую к поверхности невозмущенного океана, Иоганн Бенедикт Листинг (1808–1882) назвал геоидом.

Если перемещение массы происходит в направлении, параллельном вектору силы тяжести, то

$$dW = g_s \cdot dS \cdot \cos 0^\circ, \quad dW = g_s dS,$$

откуда

$$dS = dh = \frac{dW}{g_s}.$$

В данном случае dS – расстояние между уровнями поверхностями. Оно обратно пропорционально величине g_s : чем больше g_s , тем меньше расстояние между уровнями поверхностями. Для эллипсоида $g_s = \gamma$, $dS = dn$, $\gamma = \frac{\partial W}{\partial n}$, т. е. сила тяжести (на эллипсоиде) – это первая производная потенциала силы тяжести по нормали.

1.2. Распределение силы тяжести на поверхности эллипсоида вращения

Формулу для вычисления силы тяжести на поверхности эллипсоида получил в 1743 г. французский математик Клеро Алекси Клод (1713–1765). При выводе формулы он представил Землю состоящей из ряда эллипсоидов

дальних слоев постоянной плотности и применил при этом законы гидростатики:

$$g = g_e (1 + \beta \cdot \sin^2 B), \quad (1.6)$$

где g_e – значение силы тяжести на экваторе;

B – геодезическая широта точки на поверхности эллипсоида; при $B = 90^\circ$ получим значение силы тяжести на полюсе – g_p ;

β – коэффициент, определяющий избыток силы тяжести относительно экватора;

$$\beta = \frac{g_p - g_e}{g_e} = \frac{5}{2}q - \alpha_z,$$

где α_z – сжатие эллипсоида по гравиметрическим данным:

$$\alpha_z = \frac{5}{2}q - \beta; \quad (1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} q &= \frac{\omega^2 \cdot a^3}{f \cdot M_3} = \frac{\omega^2 \cdot a}{g_e} = \frac{C_e}{g_e}; \\ g_e &= \frac{f \cdot M_3}{a^2} (1 + 3n - q); \\ n &= \frac{K}{2a^2}, K = \left(C - \frac{A+B}{2} \right) \cdot M_3; \\ A &= f (y^2 + z^2) \cdot dm, B = f (x^2 + z^2) dm, C = f (x^2 + y^2) dm; \\ C_e &= \omega^2 a \cos B, \end{aligned} \right\} (1.8)$$

где a – большая полуось эллипсоида;

ω – угловая скорость вращения Земли;

M_3 – масса Земли;

A, B и C – главные моменты инерции Земли;

C_e – центробежная сила на экваторе.

Формула Клеро (1.6) справедлива до малых первого порядка. Более точную формулу распределения силы тяжести на поверхности эллипсоида

да, исходя из теории Стокса, вывели в 1929 г. итальянские геодезисты У. Сомильяна и П. Пицетти [14]:

$$g = \frac{a \cdot g_e \cdot \cos^2 B + b \cdot g_p \cdot \sin^2 B}{\sqrt{a^2 \cdot \cos^2 B + b^2 \cdot \sin^2 B}}. \quad (1.9)$$

Разложив знаменатель равенства (1.9) в степенной ряд и вводя обозначения для β и α из группы формул под номером (1.8), получим первую формулу Клеро с членам второго порядка малости:

$$g = g_e (1 + \beta \cdot \sin^2 B - \beta_1 \cdot \sin^2 2B), \quad (1.10)$$

$$\beta = \frac{5}{2} q - \alpha - \frac{17}{14} \cdot q \cdot \alpha,$$

где

$$\alpha + \beta = \frac{5}{2} q - \frac{17}{14} \alpha \cdot q, \quad (1.11)$$

или

$$\beta_1 = \frac{5}{8} q \cdot \alpha - \frac{1}{8} \cdot \alpha^2. \quad (1.12)$$

Формулы (1.10) и (1.11) составляют теорему Клеро с членами второго порядка малости. Коэффициент второго порядка малости β_1 характеризует сфероидальность Земли.

Численные значения коэффициентов g_e , β и β_1 определил в 1909 г. немецкий геодезист Гельмерт Фридрих Роберт (1843–1917). В период с 1901 по 1909 г. он обработал по способу наименьших квадратов 1 603 значения силы тяжести и получил формулу для вычисления значений силы тяжести γ_0 на поверхности эллипсоида:

$$\gamma_0^I = 978\,030 (1 + 0,005302 \cdot \sin^2 B - 0,0000071 \cdot \sin^2 2B). \quad (1.13)$$

Для нормальной Земли $\Delta\gamma_0 = \gamma_p - \gamma_e = 5,2$ Гал, что составляет 0,53 % от $\bar{\gamma}_0 = 981$ Гал.

При $a = 6,387 \cdot 10^6$ м, $\omega = 7,292 \cdot 10^{-5}$ рад/с = 15,04 ''/с,

$\Delta\gamma_0 - C_e = 5,2 - 3,4 = 1,8$ Гал или 0,18 % от $\bar{\gamma}_0$.

Формула Гельмерта (1.13) принята в России в качестве основной при обработке гравиметрических измерений, так как сжатие эллипсоида, вычисленное по гравиметрическим данным, близко к таковому по геодезическим данным:

$$\gamma^G = \frac{5}{2} \cdot \frac{C_e}{g_e} - \frac{g_P - g_e}{g_e} = \frac{1}{296,4}.$$

В 1930 г. в качестве международной была принята формула Кассиниса:

$$\gamma_0^K = 978\,049(1 + 0,0052884 \cdot \sin^2 B - 0,0000059 \cdot \sin^2 2B), \quad (1.14)$$

рассчитанная для эллипсоида Хейфорда. Она широко применяется за рубежом.

Для перехода от γ_0^K к γ_0^G существует зависимость:

$$\gamma_0^G = \gamma_0^K - (19,0 - 13,2 \cdot \sin^2 2B). \quad (1.15)$$

Следует отметить, что в формулах (1.13) и (1.14) коэффициент γ_0 вычислен в Потсдамской гравиметрической системе, в которой обнаружена ошибка в определении силы тяжести на исходном пункте Потсдам в +13,87 мГал. Поэтому в рассчитанные по этим формулам значения вводят поправку, равную -14 мГал.

В 1971 г. на XV Генеральной ассамблее международного геодезического и геофизического союза была принята новая формула для вычисления:

$$\gamma_0 = 978\,031,85(1 + 53,024 \cdot 10^{-4} \cdot \sin^2 B - 59 \cdot 10^{-7} \cdot \sin^2 2B), \quad (1.16)$$

соответствующая референцной системе 1967 г. Система задана независимыми величинами (фундаментальными геодезическими постоянными), полученными из наблюдений космических летательных аппаратов:

$f \cdot M = 398\,603 \text{ км}^3 \text{ с}^{-2}$ – геоцентрическая гравитационная постоянная;

$a = 6\,378\,160 \text{ м}$ – большая полуось эллипсоида;

$J_2 = 10\,827 \cdot 10^{-7}$ – зональный гармонический коэффициент;

$M = 5,976 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ – масса Земли;

$\omega = 7,2921151467 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ – угловая скорость вращения Земли;

Зная J_2 , можно вычислить сжатие эллипсоида:

$$\alpha = \frac{3}{2} J_2 + \frac{W^2 \cdot a^2}{f \cdot M} = 1/298,249. \quad (1.17)$$

Для перехода от $\gamma_{0(1930)}$ к $\gamma_{0(1971)}$ существует зависимость:

$$\gamma_{0(1971)} - \gamma_{0(1930)} = -17,2 + 13,6 \cdot \sin^2 B \text{ мГал.} \quad (1.18)$$

Формула для вычисления γ_0 , принятая в 1971 г., получена из наблюдений ИСЗ, движущихся вне атмосферы. Поэтому следует иметь в виду, что масса Земли включает массу атмосферы равную $5,1 \cdot 10^{18}$ кг.

С 1980 г. используется уточненная формула для вычисления γ_0 :

$$\gamma_0 = 978032,68 \cdot (1 + 53,024 \cdot 10^{-4} \cdot \sin^2 B - 59 \cdot 10^{-7} \cdot \sin^2 2B). \quad (1.19)$$

На поверхности Земли величина силы тяжести зависит от следующих факторов:

- широта места наблюдения;
- высота точки над поверхностью эллипсоида;
- плотностные и структурные неоднородности внутри Земли;
- приливное влияние Луны и Солнца;
- притяжение атмосферы.

Внутри Земли сила тяжести меняется по закону, проиллюстрированному на рис. 1.2.

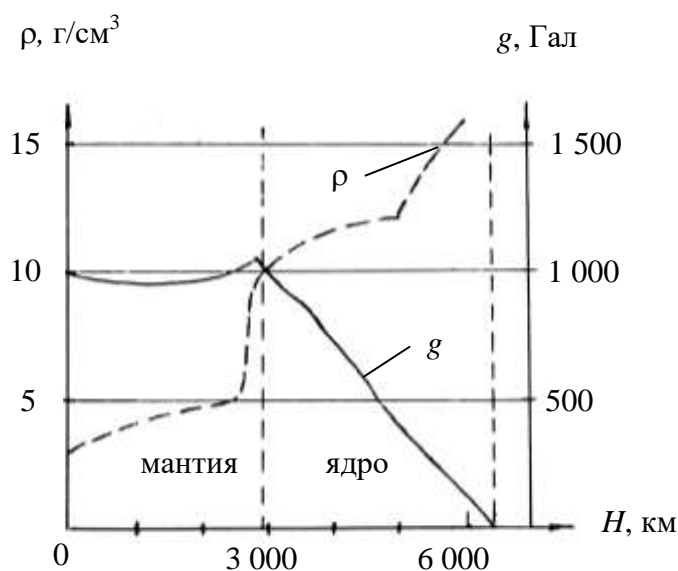


Рис. 1.2. Изменение плотности ρ и ускорение силы тяжести g внутри Земли

Если бы плотность ρ вещества в Земле была постоянной, то сила тяжести уменьшалась бы равномерно с глубиной (H). В действительности, ρ возрастает с глубиной, о чем свидетельствуют данные сейсмологии.

От поверхности Земли и до глубины около 2 500 км сила тяжести практически неизменна и составляет около 980 Гал. На границе мантия-ядро (2 900 км) сила тяжести возрастает до 1 000 Гал, а затем плавно уменьшается к центру Земли до 0 Гал.

1.3. Аномалии силы тяжести

Конечным продуктом гравиметрических работ является карта аномалий силы тяжести.

Аномалия силы тяжести – разность между величинами действительной (измеренной) g и нормальной силы тяжести γ_0 в пункте наблюдений:

$$\Delta g = g - \gamma. \quad (1.20)$$

Величина γ вычисляется по формуле:

$$\gamma = \gamma_0 + \frac{\partial \gamma}{\partial H} \cdot H, \quad (1.21)$$

где γ_0 – нормальное значение силы тяжести, вычисляемое по формуле Гельмерта, мГал;

$\frac{\partial \gamma}{\partial H} = -0,3086$ мГал/м – вертикальный градиент нормальной силы тяжести;

H – геодезическая высота, м.

По результатам обработки гравиметрических и геодезических материалов строят гравиметрические карты аномалий силы тяжести.

В практике геофизических работ используют, в основном, два типа аномалий силы тяжести.

1. Аномалия в свободном воздухе ($\Delta g_{C.B.}$):

$$\Delta g_{C.B.} = g - \gamma_0 + 0,3086 \cdot H, \quad (1.22)$$

где $0,3086 \cdot H$ – поправка за геодезическую высоту точки наблюдения.

2. Аномалия Буге (Δg_B):

$$\Delta g_B = g - (\gamma_0 - 0,3086 \cdot H + 0,0419 \cdot \bar{\rho} \cdot H - \delta g_p(\bar{\rho})), \quad (1.23)$$

где $0,0419 \cdot \bar{\rho} \cdot H$ – притяжение плоскопараллельного (промежуточного) слоя толщиной H с плотностью $\bar{\rho} = 2,67 \text{ г/см}^3$, заключенного между уровнем точки наблюдения и поверхностью эллипсоида (поправка Буге).

δg_p – поправка за влияние рельефа местности.

Для учета влияния окружающего рельефа используют различные способы, например: разбиение местности на участки, представляющие собой криволинейные призмы с наклонной верхней гранью, учет поправки по характерным формам рельефа и др. Наиболее широкое применение на практике нашли способы, разработанные П.И. Лукавченко, В.М. Березкиным, Е.А. Мудрецовой, а также методики, предложенные А.И. Каленицким, В.П. Смирновым и Г.Г. Ремпелем [11, 18, 19, 30].

Свойства аномалий силы тяжести и области их применения

При решении вопроса о фигуре Земли необходимо строгое сохранение условия Стокса: «...уровенная поверхность потенциала силы тяжести целиком охватывает все массы» [12, 25, 35], т. е. общая масса Земли и форма уровенной поверхности не должны меняться или изменяться, по возможности, мало.

При вычислении аномалии силы тяжести Δg_{CB} вводится поправка за высоту точки наблюдения. Эта редукция «переносит» значение γ_0 с эллипсоида в точку измерений без участия масс промежуточного слоя – массы Земли остаются не тронутыми.

Нормальное поле построено для эллипсоида, охватывающего все массы. Аномалии силы тяжести с редукцией в свободном воздухе Δg_{CB} являются отклонением реально наблюдающейся в данной точке силы тяжести от ее нормального значения. В этом смысле величина Δg_{CB} отражает истинное гравитационное поле [12], если высоты определены от поверхности эллипсоида, иначе – смешанное.

Редукция в свободном воздухе очень мало искажает геоид:

$$dS = \frac{dW}{\gamma} = -\frac{\pi \cdot f \cdot \bar{\rho} \cdot H^2}{\gamma}. \quad (1.24)$$

Для целого континента толщиной $H = 1$ км и $\bar{\rho} = 2,5$ г/см³:

$$dS = -\frac{3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2,5 \cdot 10^{10}}{980} \approx 6 \text{ см (5,7 см)}.$$

При вычислении аномалий силы тяжести с редукцией Буге Δg_B поправка за промежуточный слой исключает его влияние. Удаление масс между уровнем отнесения величины γ_0 и уровнем точки наблюдения нарушает условие Стокса – неизменность общей массы. Кроме того, происходит значительная деформация уровенной поверхности.

При введении поправки Буге

$$dS = \frac{dW}{\gamma} = -\frac{2\pi \cdot f \cdot \bar{\rho} \cdot H^2 \cdot a}{\gamma}. \quad (1.25)$$

При исключении влияния острова толщиной $H = 1$ км и радиусом $R = 100$ км с плотностью пород $\bar{\rho} = 2,5$ г/см³

$$dS = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 6,67 \cdot 10^{-8} \cdot 2,5 \cdot 10^5 \cdot 10^7}{980} \approx 10 \text{ м}.$$

Такова величина искажения геоида в случае регуляризации методом введения поправки Буге (операция устранения масс, выступающих над уровенной поверхностью). Поэтому Δg_B не пригодны для изучения фигуры Земли. Но при этом, в аномальном поле рельефнее проявляются аномальные массы, что нужно для целей гравиразведки.

При редукции Буге необходимо вводить поправки за окружающий рельеф.

Аномалии силы тяжести в редукции Буге на большей части Земли составляют в среднем 42,4 мГал. Максимальное значение – +660 мГал (о. Гавайи), минимальное –380 мГал – желоб Пуэрто-Рико (Атлантический океан).

1.4. Уклонение отвеса

В любой точке M земной поверхности (рис. 1.3) отвес устанавливается по линии, совпадающей с направлением действия силы тяжести Ng . Это направление перпендикулярно к уровенной поверхности $W = C$,

проходящей через данную точку М. Рассмотрим общий земной эллипсоид (ОЗЭ), наилучшим образом представляющий фигуру Земли [12, 28, 35]. В общем случае поверхность $W = C$ не параллельна поверхности ОЗЭ. Проведем нормаль nn к ОЗЭ через точку М. Угол NMn – абсолютное, или гравиметрическое (v_g) уклонение отвесной линии. Обработка всех геодезических измерений производится на референц-эллипсоиде (РЭ) данного государства. Проведем нормаль n_1n_1 к референц-эллипсоиду в точке М. Угол NMn_1 между направлением отвесной линии и нормалью к поверхности РЭ называется относительным или астрономо-геодезическим уклонением отвесных линий (v_{AG}):

$$v_{AG} = v_g - \Delta v,$$

где Δv – угол между нормальями к ОЗЭ и к РЭ

Астрономические координаты (φ и λ) контролируются направлением отвесной линии, а геодезические широты и долготы (B и L) определяются положением нормали к референц-эллипсоиду. Следовательно, уклонения отвесных линий получаются как разность астрономических и геодезических координат.

Для практических целей нужно знать проекции v_g на плоскость меридиана (ξ) и плоскость первого вертикала (η). Эти составляющие необходимы для перехода от астрономических к геодезическим координатам и обратно (рис. 1.4). На рис. 1.4:

P – полюс мира;

g – вектор силы тяжести на поверхности Земли в точке М;

n – нормаль к ОЗЭ;

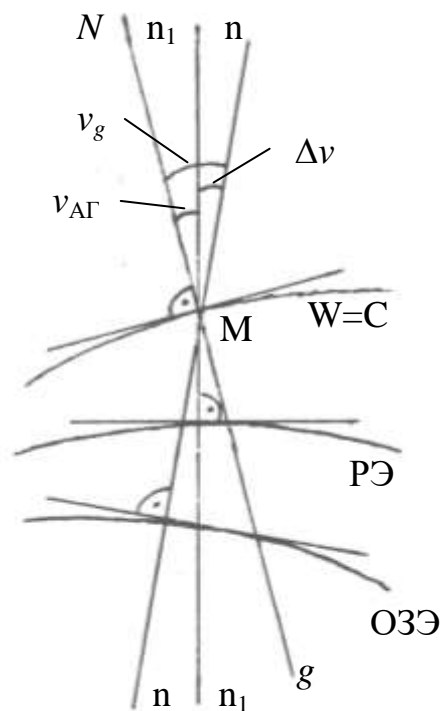


Рис. 1.3. Отсчетные поверхности и нормали к ним

n_1 – нормаль к референц-эллипсоиду;

\bar{y} – вектор нормальной силы тяжести на поверхности ОЗЭ;

Z_Γ – геодезический зенит;

Z_A – астрономический зенит;

Z_1 – нормальный зенит;

PZ_Γ – геодезический меридиан;

PZ_A – астрономический меридиан;

$Z_A Z_2$ – первый вертикал;

$PZ_\Gamma = 90^\circ - B$ – дополнение геодезической широты до 90° ;

$PZ_A = 90^\circ - \varphi$ – дополнение астрономической широты до 90° ;

$PZ_1 = 90^\circ - B_n$ – дополнение нормальной широты до 90° ;

B, φ, B_n – широты: геодезическая, астрономическая и нормальная соответственно;

$\Delta\lambda = \lambda - L$ – разница астрономической и геодезической долготы;

$Z_1 Z_A, Z_\Gamma Z_A$ – гравиметрическое (v_g) и астрономо-геодезическое (v_{AG})

уклонение отвесной линии, соответственно;

$Z_1 Z_2$ – проекция v_g на плоскость меридиана ξ_B ;

$Z_\Gamma Z_2$ – проекция v_{AG} на плоскость меридиана ξ_{AG} ,

$Z_A Z_2$ – проекции v_g и v_{AG} на плоскость первого вертикала – η_g и η_{AG} .

По рис. 1.4 видно, что связь между астрономо-геодезическими v_{AG} и гравиметрическими v_g уклонениями отвеса имеет вид:

$$\xi_{AG} = \xi_g + \Delta B,$$

где $\Delta B = B_n - B$;

$$Z_2 P = 90^\circ - (B + \xi_{AG}).$$

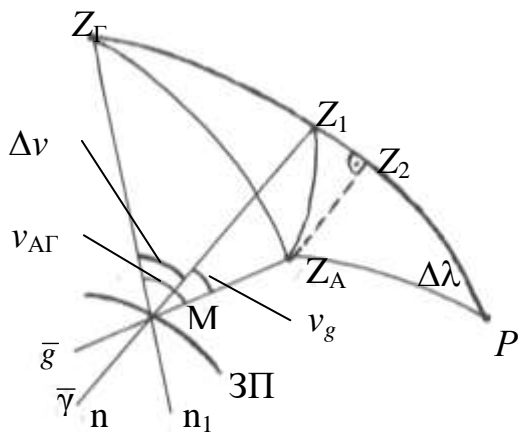


Рис. 1.4. Связь астрономических и геодезических координат

Из прямоугольного сферического треугольника Z_2Z_AP по правилу Непера – Модюи запишем:

$$\begin{cases} \cos \Delta\lambda = \cos(\lambda - L) = \operatorname{ctg}(90^\circ - \varphi) \cdot \operatorname{tg}[90^\circ - (B + \xi_{AG})] = \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{ctg}(B + \xi_{AG}); \\ \sin \eta = \sin(90^\circ - \varphi) \cdot \sin(\lambda - L) = \cos \varphi \cdot \sin(\lambda - L). \end{cases}$$

Разложим функции косинуса и синуса в ряд. Пренебрегая квадратичными членами, получим:

$$B = \varphi - \xi_{AG};$$

$$\xi = \varphi - B;$$

или

$$\begin{aligned} L &= \lambda - \eta \cdot \sec \varphi; \\ \eta &= (\lambda - L) \cdot \cos B. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Существует 3 способа определения уклонения отвесной линии.

1. Астрономо-геодезический.
2. Гравиметрический.
3. Астрономо-гравиметрический.

Гравиметрическое уклонение ν_g получим из прямоугольного треугольника ONg , в котором угол $NOg = \nu_g$ (рис. 1.5):

$$\operatorname{tg} \nu_g = \frac{g_s}{\gamma}. \quad (1.27)$$

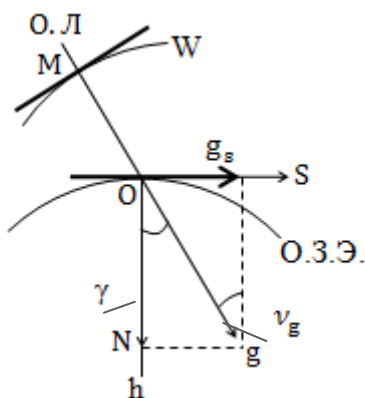


Рис. 1.5. Гравиметрическое уклонение отвеса

По малости v_g (около одной минуты), разложив функцию tg в ряд и ограничившись первым членом разложения, получим:

$$v_g = \frac{g_s}{\gamma}, \quad (1.28)$$

где γ и g_s – составляющие силы тяжести по направлениям: нормали γ и касательной S к ОЗЭ. Первая составляющая близка к среднему значению нормальной силы тяжести $\bar{\gamma}$ на поверхности ОЗЭ, а вторая обусловлена действием потенциала силы тяжести W и равна:

$$g_s = \frac{\partial W}{\partial S}. \quad (1.29)$$

Потенциал силы тяжести на земной поверхности есть сумма нормального U и возмущающего T потенциалов:

$$W = U + T. \quad (1.30)$$

С учетом (1.29) и (1.30) выражение (1.28) примет вид:

$$v_g = -\frac{1}{\gamma} \left(\frac{\partial U}{\partial S} + \frac{\partial T}{\partial S} \right). \quad (1.31)$$

Так как силовые линии нормального поля на поверхности геоида перпендикулярны к эллипсоиду, то:

$$\frac{\partial U}{\partial S} = 0; \quad (1.32)$$

$$v_g = -\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{\partial T}{\partial S};$$

$$T = \gamma \cdot \xi,$$

Найдем частную производную $\partial T / \partial S$ из формулы Брунса. Подставив ее в формулу (1.32), получим:

$$v_g = -\frac{1}{\gamma} \cdot \gamma \left(\frac{\partial \xi}{\partial S} \right) = -\frac{\partial \xi}{\partial S}. \quad (1.33)$$

Гравиметрическое уклонение отвесной линии есть частная производная превышения геоида над эллипсоидом по направлению наибольшего изменения потенциала силы тяжести на эллипсоиде или то же самое – наибольшего изменения высот.

Значение ζ задается формулой Стокса:

$$\zeta = \frac{R}{4\pi\gamma_0} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \Delta g_{CB} \cdot S(\psi) \cdot \sin \psi \cdot d\psi \cdot dA, \quad (1.34)$$

где $S(\psi)$ – функция Стокса;

$$S(\psi) = 1 + \operatorname{cosec} \frac{\psi}{2} - 6 \sin \frac{\psi}{2} - 5 \cos \psi - 3 \cos \psi \cdot \ln \left(\sin \frac{\psi}{2} + \sin^2 \frac{\psi}{2} \right), \quad (1.35)$$

где ψ – сферическое расстояние между определяемой $M(\varphi_0, \lambda_0)$ и текущей $N(\varphi, \lambda)$ точками (рис. 1.6);

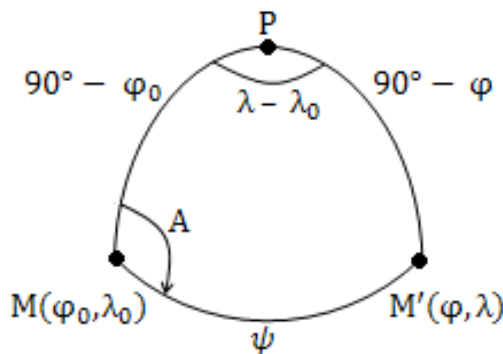


Рис. 1.6. Сферический треугольник

A – азимут линии MN ;

Δg_{CB} – аномалия силы тяжести с редукцией в свободном воздухе.

Для получения составляющих уклонения отвеса в меридиане (ξ) и в первом вертикале (η) необходимо выражение (1.33) продифференцировать по широте φ_0 и долготе λ_0 .

В первом случае $\partial S = \bar{R} \cdot \partial \varphi_0$, а во втором

$$\partial S = \bar{R} \cdot \cos \varphi_0 \cdot \partial \lambda_0,$$

где φ_0 и λ_0 – координаты точки, в которой определяются уклонение отвесной линии;

\bar{R} – средний радиус Земли.

Тогда:

$$\xi = -\frac{1}{\bar{R}} \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial \varphi_0}; \quad \eta = -\left(\frac{1}{\bar{R} \cdot \cos \varphi_0} \right) \cdot \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda_0}. \quad (1.36)$$

Подставив выражение (1.35) в (1.36), получим:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= -\frac{1}{4 \pi \gamma} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \Delta g_{\text{СВ}} \frac{\partial S(\psi)}{\partial \varphi_0} \sin \psi \cdot d\psi \cdot dA \\ \eta &= -\frac{1}{4 \pi \gamma \cdot \cos \varphi_0} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \Delta g_{\text{СВ}} \frac{\partial S(\psi)}{\partial \lambda_0} \sin \psi \cdot d\psi \cdot dA \end{aligned} \right\}. \quad (1.37)$$

Определив из решения сферического треугольника (рис. 1.6) ψ , $d\psi$, $\sin \psi$, продифференцировав выражение (1.37) по φ_0 и λ_0 и выполнив несложные математические преобразования, получим выражения для составляющих ξ и η в виде [12]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi \\ \eta \end{array} \right\} = -\frac{1}{4 \pi \gamma} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \Delta g_{\text{СВ}} \frac{\partial S(\psi)}{\partial \psi} \left\{ \begin{array}{l} \cos A \\ \sin A \end{array} \right\} \sin \psi \cdot d\psi \cdot dA. \quad (1.38)$$

Чтобы получить ξ и η в секундах дуги, умножим выражение (1.38) на ρ'' и введем обозначение:

$$-\frac{\rho''}{2 \gamma} \cdot \frac{\partial S(\psi)}{\partial \psi} \sin \psi = Q(\psi) - \text{функция Веннинг-Мейнеса}. \quad (1.39)$$

Функция Веннинг-Мейнеса непрерывна во всей области, кроме точки $\psi = 0$. Строгая формула для вычисления Q имеет вид:

$$\begin{aligned} Q(\psi) &= \frac{\rho''}{2 \gamma} \cos^2 \frac{\psi}{2} \left[\cos ec \frac{\psi}{2} + 12 \sin \frac{\psi}{2} - 32 \sin^2 \frac{\psi}{2} + 3 / \left(1 + \sin \frac{\psi}{2} \right) - \right. \\ &\left. - 12 \sin^2 \frac{\psi}{2} \ln \left(\sin \frac{\psi}{2} + \sin^2 \frac{\psi}{2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1.40)$$

Исследование функции $Q(\psi)$ выполнил В.Ф. Еремеев [15]. Числовые значения функции $Q(\psi)$ приведены в табл. 1.1, а ее ход показан на рис. 1.7.

Таблица 1.1

Значения функции Веннинг-Мейнеса

| ψ | 0° | 1° | 10° | 20° | 30° | 72° | 80° | 180° |
|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| $Q(\psi)$ | ∞ | +12,370 | +1,591 | +1,02 | +0,79 | 0 | -0,15 | 0 |

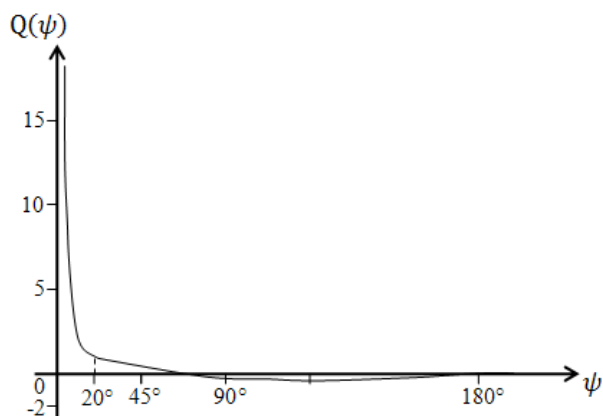


Рис. 1.7. График изменения хода функции Веннинг-Мейнеса

По табл. 1.1 и рис. 1.7 видно, что функция Веннинг-Мейнеса быстро убывает в пределах от 0 до 20° , а от 20° до 180° – близка к нулю.

Это указывает на возможность разделить область интегрирования на две: от 0 до 10° и по всей остальной площади.

Если интегрирование вести в пределах от 0 до 10° , то функцию Q можно упростить, разложив ее по малости ψ в ряд. Ограничившись первым порядком малости ψ , получим приближенное значение Q_1 функции Веннинг-Мейнеса:

$$Q_1 = \frac{\rho''}{2\gamma} \left(\frac{2}{\psi^\circ} + \frac{42}{12} \psi^\circ + 3 \right). \quad (1.41)$$

Заменим угловое расстояние ψ° линейным r по дуге большого круга:

$$r = \bar{R}\psi = \bar{R}\psi^\circ \cdot \frac{2\pi}{360}.$$

Получим:

$$\psi^{\circ} = \frac{360r}{2\pi\bar{R}}. \quad (1.42)$$

Подставив (1.42) в (1.41), получим:

$$Q_1 = \frac{\rho''}{2\gamma} \left(\frac{4\pi\bar{R}}{360} \cdot \frac{1}{r} + \frac{49}{12} \cdot \frac{360}{2\pi\bar{R}} \cdot r + 3 \right).$$

Полагая, что $\rho'' = 20\,6265$, $\gamma = 981\,000$ мГал, $\bar{R} = 6\,371$ км, и обозначая постоянные коэффициенты через А, В и С, получаем:

$$Q_1 = \frac{A}{r} + B \cdot r + C, \quad (1.43)$$

где $A = 1\,339,6$; $B = 66 \cdot 10^{-6}$, $C = 0,315$.

В выражении (1.43) первые слагаемые при малых значениях r являются определяющими. Поэтому принято выделять центральную зону от 0 до r_0 , где величину Q_1 можно найти по формуле:

$$Q_1 = \frac{1340}{r}.$$

С учетом вышеизложенного, величины составляющих уклонения отвеса ξ'' и η'' и высоты квазигеоида вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \left\{ \begin{array}{l} \xi'' \\ \eta'' \end{array} \right\} &= -\frac{1340}{2\pi\bar{R}} \int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \frac{\Delta g}{r} \left\{ \begin{array}{l} \cos A \\ \sin A \end{array} \right\} dr \cdot dA - \frac{1}{2\pi\bar{R}} \int_{r_0}^{r_1} \int_0^{2\pi} \Delta g Q_1 \left\{ \begin{array}{l} \cos A \\ \sin A \end{array} \right\} dr \cdot dA; \\ \zeta, \mu &= \frac{1}{2\pi\gamma} \left[\int_0^{r_0} \int_0^{2\pi} \Delta g \cdot dr \cdot dA + \int_0^{r_1} \int_0^{2\pi} \Delta g \cdot F(r) \cdot dr \cdot dA \right], \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

где $F(r) = A \ln r + \frac{B}{2} r^2 + c \cdot r$,

где $\Delta g = \Delta g_{св} - \text{см. обозначения на стр. 23.}$

По известным аномалиям силы тяжести в свободном воздухе по формулам (1.44) можно вычислить составляющие уклонения отвесной линии в меридиане ξ'' и в первом вертикале (η''). Влияние аномалий силы тяжести необходимо учитывать в области от 0° до 20° (от 0 до 2 000 км).

1.5. Гравиметрические данные в задачах инженерной геодезии*

Монтаж оборудования в большинстве случаев ведут с относительной погрешностью 10^{-4} – 10^{-5} (1мм на 100 м), а съемочные работы – с еще меньшей точностью. При этом гравитационное поле в пределах стройплощадки считается однородным.

При работах с относительными погрешностями порядка 10^{-5} – 10^{-6} гипотеза однородности поля силы тяжести перестает себя оправдывать и поэтому приходится переходить от материализованной прямоугольной координатной системы к координатной системе, в которой учитывается положение силовых линий – кривая, касательная к которой в каждой точке совпадает с вектором силы тяжести (рис 1.8).

Силовые линии – плоские кривые, обращенные выпуклостью к экватору. Они имеют кривизну, не параллельны друг другу.

Вместе с силовыми линиями искривляются и поверхности, ортогональные им. Эти поверхности называют уровенными, или эквипотенциальными поверхностями равного потенциала: $W = C$. В таких условиях работать геодезисту становится трудно.

Но, если не принимать во внимание все сказанное, то точность 10^{-6} останется недостижимой. При неоднородном поле силы тяжести будет наблюдаться отклонение оси вращения теодолита от координатной линии Z (силовая линия). Поэтому при измерениях геодезических величин (линий, углов, превышений) необходимо учитывать отклонения отвесных линий.

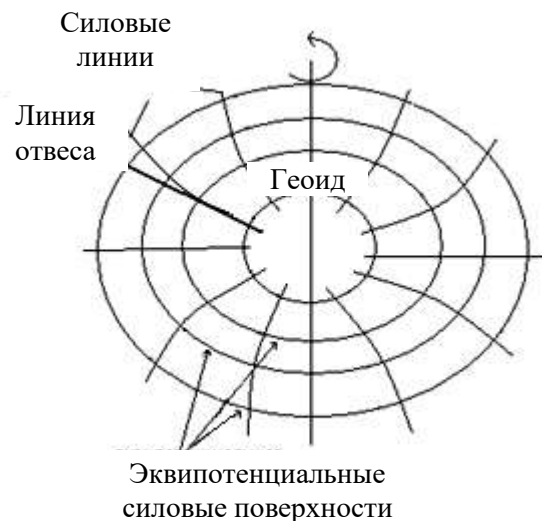


Рис. 1.8. Силовое поле геоида

* При написании данного раздела были использованы работы В.В. Бровара, Л.В. Огородовой, Л.П. Пеллилена [4, 28, 30, 31].

1.5.1. Поправка в измеренное горизонтальное направление

Горизонтальное направление – линия пересечения вертикальной плоскости, проходящей через отвесную линию (вертикальную ось теодолита) и наблюдаемый пункт, с горизонтальной плоскостью (плоскостью лимба теодолита).

Пусть M – пункт на поверхности Земли (рис. 1.9), S – сфера произвольного радиуса с центром в точке M , n – нормаль к эллипсоиду. Она пересекает S в геодезическом зените – точке Z . Направление отвесной линии, контролируемое вектором силы тяжести \bar{g} , дает в пересечении со сферой астрономический зенит – точку Z_g ; v – уклонение отвеса; MQ – измеренное направление на пункт Q .

Требуется получить редуцированное (исправленное) направление Z_gQ . Проведем через Z_g линию ЛЛ, параллельную Z_TQ . Угол δ_1 между ЛЛ и направлением Z_gQ является поправкой в горизонтальное направление.

Опустим перпендикуляр из Z_g на направление Z_TQ . Тогда v можно разложить на составляющие $v_A = Z_TQ$ в азимуте редуцированного направления и $v_{A+90^\circ} = Z_gK$ – в перпендикулярном направлении.

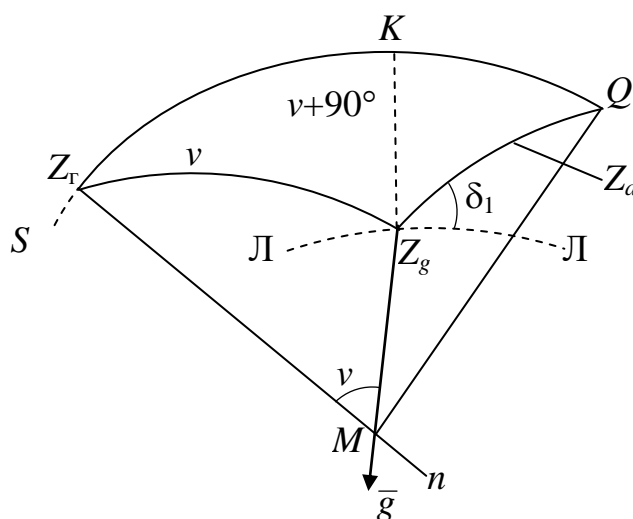


Рис. 1.9. Поправка в измеренное горизонтальное направление

Из прямоугольного треугольника $Z_g nQ$:

$$\cos(90^\circ - \delta_1) = \operatorname{tg} v_{A+90^\circ} \cdot \operatorname{ctg} Z_a, \quad (1.45)$$

где Z_a – астрономическое зенитное расстояние точки Q .

По малости v , которое обычно не превышает нескольких секунд, можно записать:

$$\delta_1 = v_{A+90^\circ} \cdot \operatorname{ctg} Z_a. \quad (1.46)$$

Применив формулу составляющей отвеса в произвольном азимуте A

$$v = \xi^{\operatorname{ar}} \cdot \cos A + \eta^{\operatorname{ar}} \sin A, \quad (1.47)$$

найдем:

$$v_{A+90^\circ} = \eta^{\operatorname{ar}} \cdot \cos A - \xi^{\operatorname{ar}} \cdot \sin A. \quad (1.48)$$

Формулу (1.48) подставим в (1.46) и получим окончательное выражение поправки δ_1 за уклонение отвеса:

$$\delta = (-\xi^{\operatorname{ar}} \cdot \sin A + \eta^{\operatorname{ar}} \cdot \cos A) \cdot \operatorname{ctg} Z_a. \quad (1.49)$$

Составляющие v , ξ и η отклонения отвеса в азимуте A считаются положительными, если луч отвесной линии, направленный вверх, отклоняется от оси Z на северо-восток [4].

Особенностью специальных геодезических сетей являются значительные углы наклона, достигающие 30 – 40° . При таких углах коэффициент $\operatorname{ctg} Z_a$ равен $0,58$ – $0,84$, поэтому уклонения отвесной линии нужно знать не грубее точности измерения горизонтальных углов: $0,2''$ – $0,4''$.

1.5.2. Поправка в зенитное расстояние

Из прямоугольного сферического треугольника $Z_g QK$ (см. рис 1.9) по аналогии Непера – Мадюи запишем:

$$\cos Z_a = \cos(v_{A+90^\circ}) \cdot \cos QK.$$

По малости ν можно считать, что $\cos(\nu_{A+90^\circ}) = 1$, а дуга QK равна разности геодезического зенитного расстояния точки Q : ($Z_\Gamma = QZ_\Gamma$) и уклонения отвеса ν_A в азимуте измеряемого направления: $QK = Z_\Gamma - \nu_A$. Тогда:

$$Z_\Gamma = Z_a + \nu_A. \quad (1.50)$$

Поправка в зенитное расстояние одинакова для всех направлений, лежащих в одной вертикальной плоскости по одну сторону от зенита, и она вводится в том случае, если точность измерений Z сравнима с величиной ν , т. е. при погрешности m_Z более $\pm 1''$.

1.5.3. Влияние уклонения отвеса на измеряемое расстояние

На рис. 1.10 проиллюстрирована методика учета влияния уклонения отвесной линии на измеряемое расстояние.

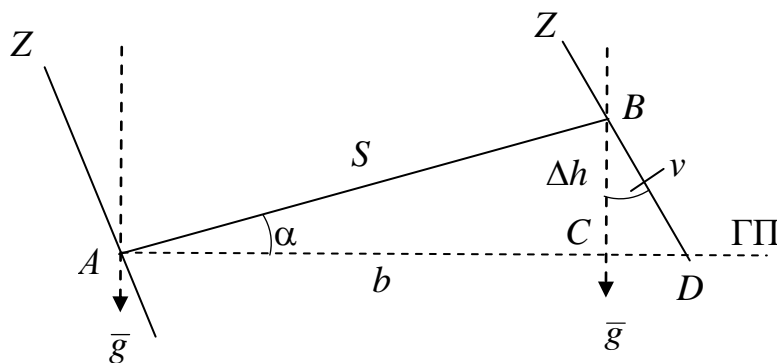


Рис.1.10. К определению поправки в измеряемое расстояние

На рис. 1.10: S – измеренное расстояние между точками A и B ; $BC = \Delta h$ – превышение B над A относительно горизонтальной плоскости; \bar{g} – вектор силы тяжести; ν – уклонение отвесной линии, α – угол наклона линии AB относительно горизонта (ГП).

Поправка за угол наклона α дает величину горизонтального проложения $AC = b$. Однако, на практике редуцирование расстояний ведут не по

отвесным линиям, а по координатным (на рис. 1.10 – AZ и BZ). Из-за этого возникает дополнительная поправка δb , равная СД:

$$\delta b = \Delta h \cdot \operatorname{tg} \nu. \quad (1.51)$$

Разложив по малости ν функцию тангенса в ряд и ограничившись первым членом разложения, получим:

$$\delta b = \Delta h \cdot \nu.$$

Если измеряемая линия состоит из нескольких пролетов, и длина ее невелика, то величину ν можно считать постоянной. Тогда:

$$\delta b = \nu \cdot \sum \Delta h_i, \quad (1.52)$$

где Δh_i – превышение по i -му пролету линии.

1.5.4. Влияние уклонения отвеса на результаты тригонометрического и геометрического нивелирования

Влияние уклонения отвеса на результаты нивелирования проиллюстрировано на рис. 1.11.

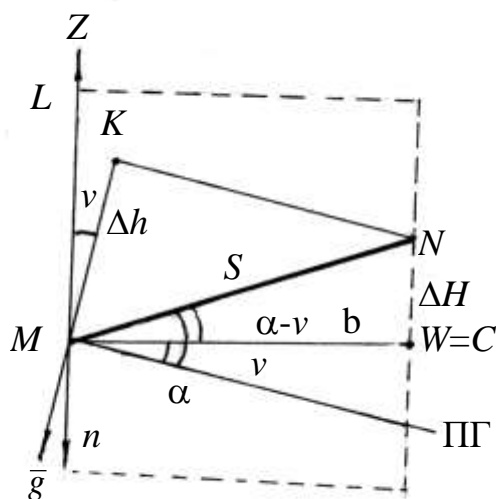


Рис. 1.11. К определению влияния уклонению отвеса на результаты нивелирования

На рис. 1.11: S – измеренное расстояние между точками M и N ; \bar{g} – вектор силы тяжести (отвесная линия); MZ – направление нормали к эквипотенциальной поверхности, $W = C$; ΔH – разность геодезических высот в точках M и N – превышение над уровенной поверхностью $W = C$, полученное из тригонометрического нивелирования, Δh – превышение между точками M и N , полученное из геометрического нивелирования; b – проекция S на плоскость горизонта (ПГ); α – угол наклона линии MN ; ν – уклонение отвесной линии; LMN – полуплоскость, проходящая через аппликату Z пункта M в пункт N .

По рис. 1.11 видно, что

$$\Delta H = S \cdot \sin(\alpha - \nu) = b \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \nu),$$

или

$$\Delta H = S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \nu - S \cdot \cos \alpha \cdot \sin \nu. \quad (1.53)$$

По малости ν (около секунды) примем $\cos \nu = 1$, $\sin \nu = \nu$.

Тогда:

$$\Delta H = S \cdot \sin \alpha \cdot \cos \nu - \nu \cdot S \cdot \cos \alpha.$$

Второе слагаемое представляет собой поправку в измеренное превышение ΔH за уклонение отвеса.

Так как $S \cdot \cos \alpha = b$ и $S \cdot \sin \alpha = \Delta h$, получим

$$\Delta H = \Delta h - \nu \cdot b. \quad (1.54)$$

Следовательно, при средней разности уклонения отвеса $0,5''$ и расстоянии 2 км влияние уклонения отвеса на разность высот составляет 5 мм.

1.5.5. Редуцирование азимута в шахту

Пусть на поверхности Земли находятся две точки M и N , расстояние между которыми $MN = S$. Азимут линии MN равен A . На глубине H от поверхности Земли находится шахта, в которую необходимо редуцировать линию MN (рис. 1.12).

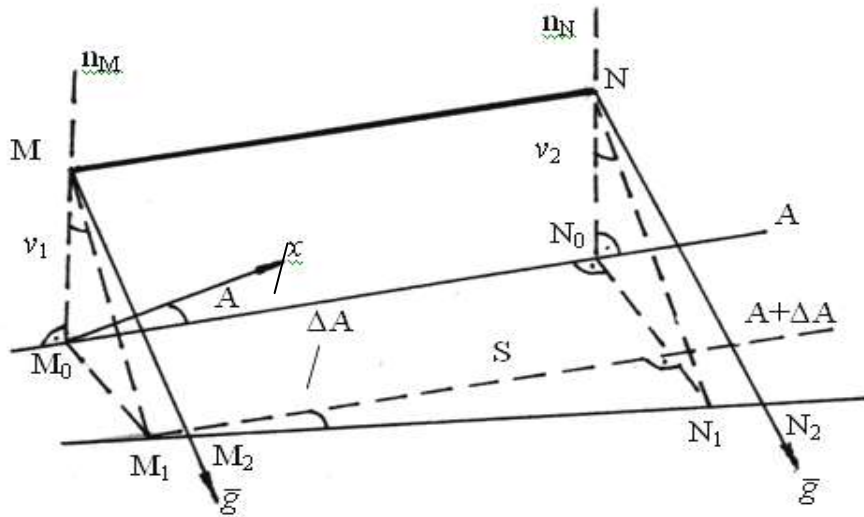


Рис. 1.12. Редуцирование азимута в шахту

Спроецируем точки M и N на отсчетную плоскость по нормали – в точки M_0 и N_0 , и по отвесам \bar{g}_M и \bar{g}_N – в точки M_2 и N_2 (соответственно). Линия M_2N_2 получит приращение азимута ΔA , которое необходимо определить.

Проведем через нормали n_M и n_N плоскости, перпендикулярные направлению S (M_0N_0). Они пересекут линию M_2N_2 в точках M_1 и N_1 соответственно.

Расстояния M_0M_1 и N_0N_1 определим через составляющие уклонения отвеса v_1 и v_2 в азимуте $A + 90^\circ$:

$$\begin{aligned} M_0M_1 &= (v_{A+90^\circ})_{M_1} \cdot H; \\ N_0N_1 &= (v_{A+90^\circ})_{N_1} \cdot H, \end{aligned} \tag{1.55}$$

где

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= -\xi_1 \sin A + \eta_1 \cos A \\ v_2 &= -\xi_2 \sin A + \eta_2 \cos A \end{aligned} \right\};$$

$$\operatorname{tg} \Delta A = \frac{N_0N_1 - M_0M_1}{M_1N_1} = \frac{(v_2 - v_1) \cdot H}{S_0}. \tag{1.56}$$

По малости ν , разложив тангенс в ряд и ограничившись первым членом разложения, получим:

$$\Delta A = - \left(\Delta \xi^{\text{ар}} \cdot \sin A - \Delta \eta^{\text{ар}} \cdot \cos A \right) \cdot \frac{H}{S_0}. \quad (1.57)$$

Если при редуцировании используются оптические центриры, то $\Delta \xi$ и $\Delta \eta$ определяются в точках M и N на поверхности Земли, а если использованы отвесы, то в точках M_2 и N_2 шахты.

2. УСТРОЙСТВО ГРАВИМЕТРА

Гравиметр – прибор для измерения силы тяжести. Работа гравиметра основана на статическом методе, в котором наблюдают положение равновесия тела, находящегося под действием силы тяжести и силы, принятой за эталонную.

За эталонную силу принимают упругую силу деформации пружин и нитей.

Устройство, с помощью которого компенсируется действие силы тяжести на тело постоянной массы и ее изменение преобразуется в перемещение тела, называется *чувствительным элементом*.

Большинство современных гравиметров являются механическими. Чувствительный элемент такого гравиметра называется упругой системой, которая является главным узлом любого гравиметра.

Существует много типов гравиметров. Первый отечественный кварцевый астазирванный гравиметр ГАК-3М был создан в 1953 г. во ВНИИ Геофизики группой специалистов, возглавляемой К.Е. Веселовым. В дальнейшем на его основе были разработаны гравиметры ГАК-ПТ, ГАК-7Т, ГАК-7Ш и др. Наиболее широкое применение на практике нашел гравиметр ГАК-7Т. Погрешность измерения силы тяжести этим гравиметром в зависимости от применяемой методики наблюдения составляет 0,03–0,06 мГал.

Основные характеристики гравиметров приведены в стандарте ГОСТ 13017–83 «Гравиметры наземные. Общие технические условия» и в стандарте СЭВ 5578–86 «Общие технические требования и методы испытаний» [9], а также в табл. 2.1.

Технические характеристики гравиметров

| Модель, страна-изготовитель | Год выпуска | Порог чувствительности, мГал | Точность измерения, мГал | Диапазон без перестройки, мГал | Измерения с перестройкой, мКал | Увеличение окуляра | Высота, мм | Наружный диаметр, мм | Масса, кг | Примечания |
|-----------------------------|-------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|------------|----------------------|-----------|---|
| ГAK-3M, СССР | 1953 | 0,05 | 0,05–0,4 | 100–150 | 3 000 | 200 | 488 | 188 | 8,5 | ГAK – гравиметр астазирванный кварцевый. Первый отечественный астазирванный кварцевый гравиметр |
| ГAK-4M, СССР | 1958 | 0,03–0,05 | 0,05–0,2 | 80–120 | 3 000 | 200 | 465 | 175 | 7,5 | |
| ГAK-ПТ, СССР | 1960 | 0,03–0,05 | 0,05–0,2 | 100–150 | 5 000 | 250 | 480 | 180 | 7,5 | ГAK-ПТ – гравиметр астазирванный кварцевый, повышенной точности |
| KBГ-1M, СССР | 1961 | 0,01 | 0,02–0,08 | 70–100 | 3 000 | 800 | 390 | 133 | 4,2 | KBГ – кварцевый высокоточный гравиметр. |
| ГAK-7Т, СССР | 1963 | 0,02 | 0,03–0,06 | 80–120 | 5 000 | 200 | 425–470 | 210 | 5,0 | С 1967 по 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–67 выпускался под названием ГР-К2; с 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–73 носит название ГНУ-К2, отличается от ГAK-7Т менее совершенной температурной компенсацией. |
| ГAK-7н, СССР | 1963 | 0,03–0,05 | 0,04–0,05 | 80–120 | 3 000 | 200 | 425 | 210 | 5,0 | |
| ГAK-7ш, СССР | 1963 | 0,01–0,05 | 0,03–0,06 | 80–100 | 1 000 | 200 | 425 | 210 | 5,0 | |
| ГAK-7л, СССР | 1963 | 0,01–0,05 | 0,03–0,06 | 80–100 | 1 000 | 200 | 425 | 210 | 5,0 | |
| ГАГ-2, СССР | 1966 | 0,005 | 0,1–0,15 | 5 000 | – | 15 | 450 | 350 × 250 | 25 | С 1973 г. в соответствии с ГОСТ 13017–73 называется ГНУ-К1 |
| «Дельта», СССР | 1971 | 0,01 | 0,06 | 80 | 5 000 | 600 | 550 | 250 | 5,0 | |
| ГР-К-1, СССР | 1972 | 0,01 | 0,03 | 80 | 5 000 | 400 | 425–470 | 210 | 5,0 | |
| «Уорден», США | 1948 | 0,01 | 0,02–0,08 | 80 | 5 000 | 600 | 290 | 120 | 2,3 | |
| «Шарп», Канада | | 0,01 | 0,02–0,08 | 80–100 | | | 400 | 140 | 4,5 | |

Все типы гравиметров различаются конструктивными особенностями устройства упругих систем, что влияет на их точностные характеристики. Механическая часть у всех гравиметров остается практически неизменной, что упрощает процесс изготовления и наладки чувствительных систем.

В данном разделе рассматривается устройство и работа гравиметра наземного узкодиапазонного кварцевого второго класса точности ГНУ-КВ [11, 27, 28, 36].

Этот гравиметр применяется для детальных разведочных работ. Погрешность измерения им силы тяжести в рейсах продолжительностью не более 4 часов составляет $\pm 0,03$ мГал, порог чувствительности $\pm 0,006$ мГал. Вес прибора 4,5 кг.

На рис. 2.1 представлен гравиметр. На внутренней поверхности, на дне и под крышкой футляра укреплены поролоновые амортизаторы, обшитые тканью.



Рис. 2.1. Гравиметр: а) внутренняя часть прибора; б) общий вид прибора; в) транспортировочный футляр цилиндрической формы, изготовленный из жести

Средняя часть гравиметра (рис. 2.2) помещена во внешний кожух 1, который представляет собой полый цилиндр из листовой нержавеющей стали диаметром 132 мм с зеркальной внешней поверхностью.



Рис. 2.2. Составные части гравиметра

Внутри кожуха помещен цилиндр из пенопласта 2, в который вставляется сосуд Дьюара 3, а в него плотно входит средняя часть гравиметра 5. Уплотнение достигается с помощью шерстяного чехла 4, одеваемого на среднюю часть. Шерстяной чехол выполняет также роль теплоизолятора и предотвращает соприкосновение металла средней части гравиметра со стеклянными стенками сосуда Дьюара, предохраняя, тем самым, последний от разбиения.

Нижний торец цилиндра внешнего кожуха соединен с массивным основанием из текстолита, на котором по окружности, через 120° , укреплены три установочных винта. На нижней части подъемных винтов укреплены шарнирные круглые подпятники, которые увеличивают площадь опоры гравиметра на грунт.

На верхней части винтов находятся головки из эбонита, с помощью которых вращаются подъемные винты. База гравиметра d – расстояние между линией, соединяющей центры двух подъемных винтов и линией, проходящей через третий винт параллельно первой – 120 мм. Средняя часть прибора состоит из основания кварцевой системы, теплозащитного столба и верхней панели (рис. 2.3).

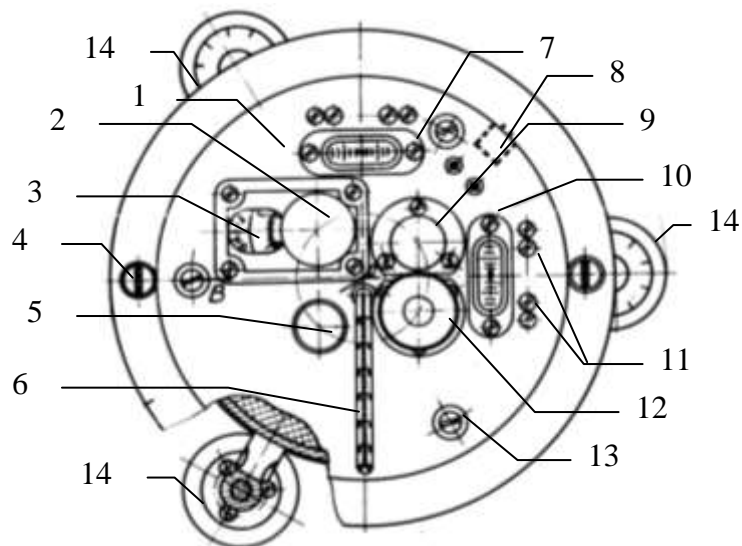


Рис. 2.3. Верхняя панель гравиметра

Средняя часть гравиметра представлена на рис. 2.4.

Основание *16* представляет собой цилиндр, на нижнем торце которого размещается конусообразная стойка *26*. На стойку крепится специальная кварцевая втулка *27*, к которой приваривается основная монтажная рамка кварцевой системы. Кварцевая система закрепляется защитным «стаканом» *28*, который притягивается к основанию специальной кольцевой гайкой *29*.

Между основанием и стаканом прокладывается уплотнительное резиновое кольцо *43*, обеспечивающее герметизацию защитного стакана. Из пространства под стаканом откачивается воздух. Для этого на боковой поверхности основания имеется отверстие, куда вмонтирован вакуумный кран (рис. 2.8), представляющий собой запорный вентиль *31*. С уплотнениями и гайками. Чтобы откачать воздух применяется 2 ключа. Откачка воздуха не требует разборки измерительной части гравиметра. В торец основания ввернуты 3 стойки *33* предохраняющие упругую систему от повреждения при снятии «стакана». В основании имеется пять сквозных, осевых отверстий: два – для измерительного и диапазонного устройства, два – для оптической системы и одно – для термометра. Основание соединено с верхней панелью цилиндром – теплоизолятором *10*. Внутри этого цилиндра расположено 5 трубок в которых проходят: стержни измерительного *11* и диапазонного *45* винтов, стержень из оргстекла *20*, тер-

мометр (рис. 2.4) и оптический канал 44. Для защиты кварцевой системы от теплообмена через верхнюю панель, пространство между трубками заполнено теплоизолирующими материалами.

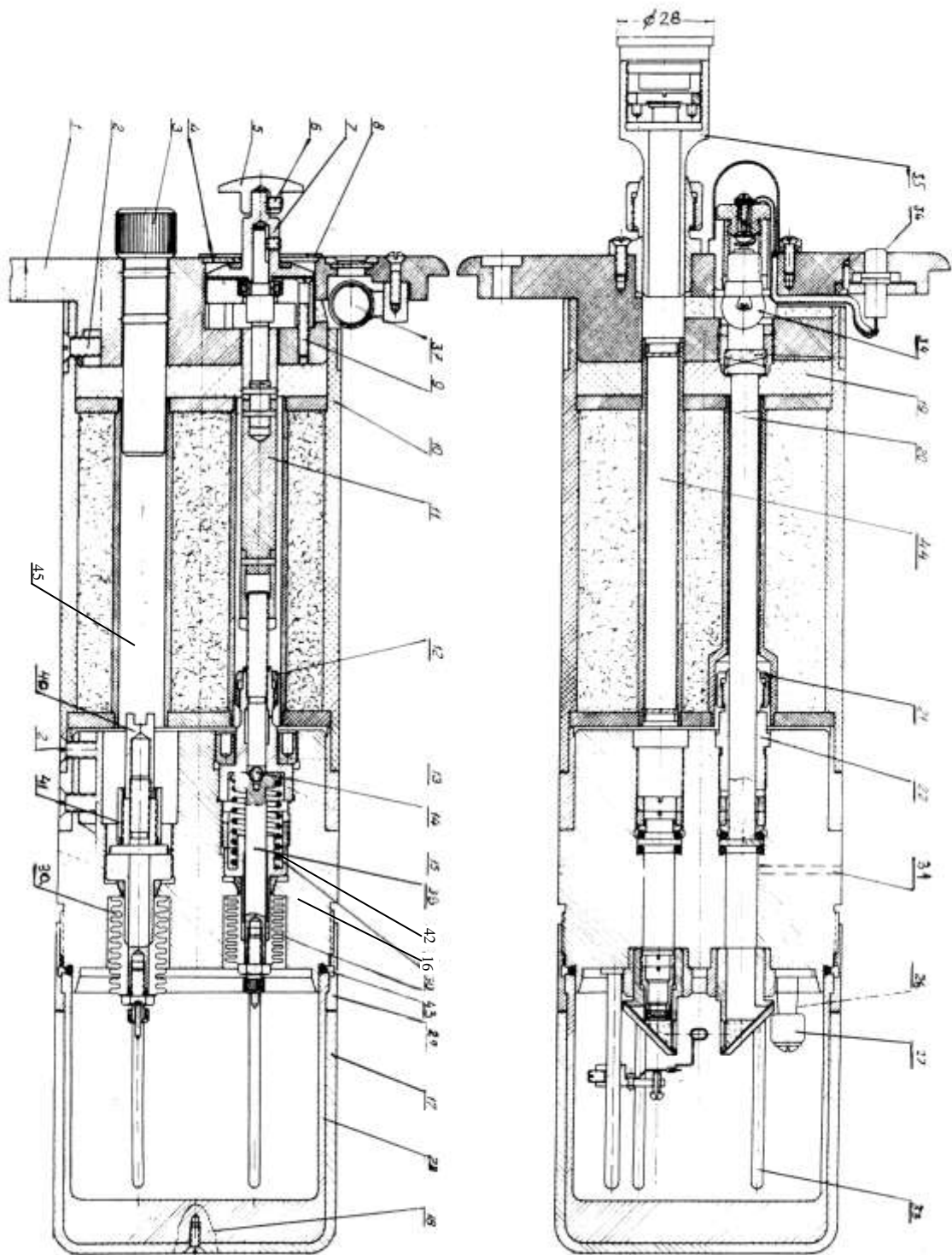


Рис. 2.4. Средняя часть гравиметра

Верхняя панель (см. рис. 2.3) представляет собой толстый диск из текстолита, служащий одновременно крышкой прибора и пробкой, закрывающей сосуд Дьюара сверху. Панель крепится тремя винтами 13 к фигурному кольцу внешнего корпуса.

Под винты подложены амортизирующие втулки (см. рис. 2.3). На верхней панели размещены: микровинт 2, отсчетное устройство 3, лампочка подсвета с конденсором 9, окуляр микроскопа 12, гнездо для подвода электропитания 8, два уровня 7 и 10 с юстировочными винтами 11, а так же ртутный термометр 6 с ценой деления 0,5 °С для измерения температуры внутри прибора, и отверстие для диапазонного ключа 5.

Гравиметр включает несколько систем: чувствительную, или кварцевую, нивелирования, электрическую, оптическую, диапазонную, вакуумирования и термостатирования.

2.1. Кварцевая упругая система

Главной частью прибора является упругая кварцевая система, изготовленная из чистого кварцевого стекла (плавленый кварц), которая изображена на рис. 2.5. Она состоит из следующих основных узлов: чувствительного элемента, представляющего собой вертикальный сейсмограф Голицина, трех пружин (главной 1, измерительной 2 и диапазонной 3), а также устройства для температурной компенсации 10–15,17.

Все перечисленные элементы смонтированы на кварцевом каркасе 16, который посредством стойки 29 прикреплен к верхнему основанию корпуса гравиметра 30.

Между концами П-образной части монтажной рамки 16 натянута горизонтальная кварцевая нить 9, на которой укреплены измерительная рамка 8 и осевой стержень 25. Этими элементами системы горизонтальная нить разделена на 4 части: нити 6–6 и 9–9.

Чувствительный элемент системы представляет собой рычаг сложной формы, подвешенный на горизонтальных нитях 9 и главной пружине 1. Рычаг состоит из осевого стержня 25, к которому прикреплен горизонтальный стержень 5, нижний отросток 4, задний 26 и вертикальный (Г-образной формы) 20. На конце стержня 5 укреплен платиновый грузик 24. Платиновая навеска служит для увеличения момента масс и ис-

ключения прилипания маятника к ограничителю 7. Она также уменьшает действие электростатических зарядов. Вес платинового грузика 0,03 г.

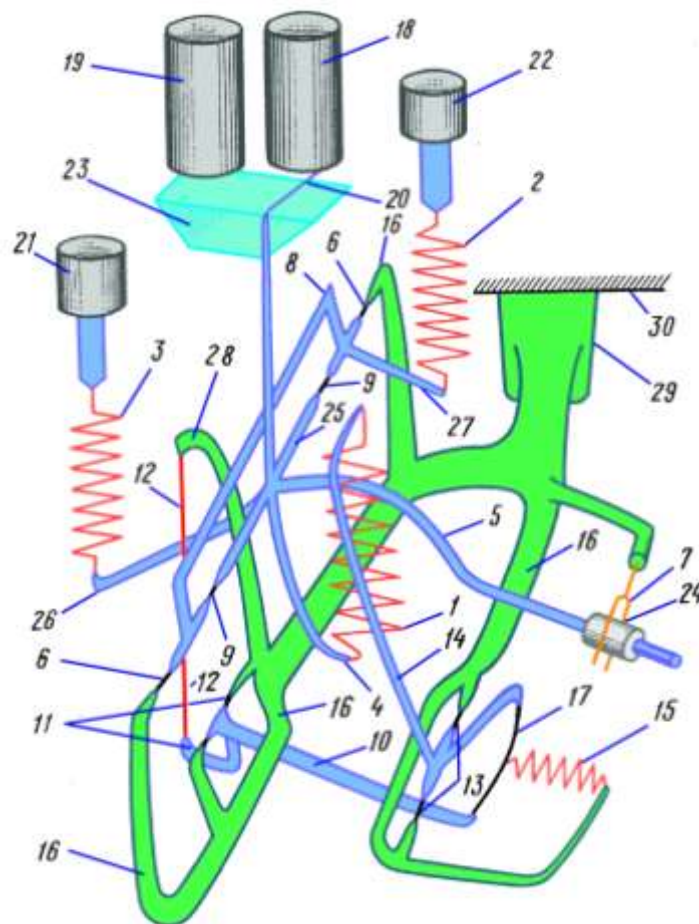


Рис. 2.5. Кварцевая упругая система гравиметра ГНУ-КВ

Температурный компенсатор состоит из горизонтального стержня 10 (первый рычаг температурного компенсатора), один конец которого (с отростком) посредством кварцевых нитей 11 прикреплен к монтажной раме 16. К отростку рычага 10 приварена медная проволочка 12, второй конец которой укреплен на отростке монтажной рамы 16. Ко второму концу кварцевого рычага 10 приварена кварцевая нить 17, второй конец которой соединен со вторым рычагом температурного компенсатора 14, вращающимся на нитях 13.

Главная пружина 1 нижним концом прикреплена к отростку 4 маятника, а верхним – ко второму рычагу температурного компенсатора 14.

Принцип действия системы заключается в следующем: при изменении силы тяжести маятник 5 будет отклоняться от первоначального поло-

жения равновесия до тех пор, пока силы, вызванные деформацией главной пружины и нитей подвеса маятника 9, не уравновесят изменение силы тяжести. Главная пружина соединена с маятником таким образом, что при изменении силы тяжести возникает дополнительный упругий момент силы главной пружины, знак которого совпадает со знаком изменения силы тяжести. Упругий момент, создаваемый главной пружиной 1 примерно в 100 раз больше остальных упругих моментов (диапазонной, измерительной и сил кручения нитей подвеса). Поэтому очень небольшие изменения силы тяжести вызывают большие деформации пружины и, следовательно, большие углы поворота маятника. Такие системы называются астазирванными. При изменении наклона гравиметра изменяется его чувствительность. Если гравиметр наклоняется так, что прибор со стороны груза маятника поднимается относительно горизонта, то чувствительность возрастает. При наклоне в обратную сторону чувствительность уменьшается. Нормальное рабочее положение системы соответствует такому наклону всего прибора, при котором ось вращения маятника и центр тяжести груза лежат в одной горизонтальной плоскости, которая называется главной плоскостью гравиметра. Это положение соответствует минимальной чувствительности гравиметра к наклону.

При повороте маятника, вызванном изменением силы тяжести или компенсирующей силы, чувствительность упругой системы также изменится. Если сила тяжести уменьшается (маятник поднимается вверх), чувствительность возрастает. При возрастании силы тяжести (маятник опускается вниз) чувствительность уменьшается. Если перемещать по окулярной шкале положение исходной точки (отсчетного штриха), то чувствительность будет изменяться. Перемещение отсчетного штриха в сторону, соответствующую уменьшению силы тяжести, приводит к уменьшению чувствительности гравиметра, а в сторону, соответствующую увеличению силы тяжести – к увеличению чувствительности. При изменении силы тяжести маятник качается в вертикальной плоскости и вместе с ним перемещается рычаг 20 с горизонтальным стержнем на конце, называемым подвижным индексом (кварцевый стержень 10–15 мкм). Подвижный индекс освещается лучом света от осветителя 19, проходящим через призму 23 в микроскоп 18. Подвижный индекс освещается так, что проходящий свет создает интерференционную полосу, соизмеримую с шириной штриха

окулярной шкалы. За его изображением наблюдают в микроскоп. Ввиду того, что момент упругих сил измерительной пружины непропорционален углу поворота маятника, его изменение непропорционально приращению силы тяжести. Таким образом, шкала, на которой регистрируют изменение силы тяжести, будет неравномерной. Этот недостаток устраняется тем, что на каждой точке маятник приводят в одно и то же исходное (горизонтальное) положение. Тем самым, изменение силы тяжести компенсируется упругой силой пружин и нитей, величину которой можно отсчитывать по равномерной шкале. Компенсация небольших изменений силы тяжести осуществляется изменением крутильного момента нитей подвеса маятника 9, угол закручивания которых изменяется при повороте рамки 8. Последняя поворачивается из-за растяжения измерительной пружины 2 посредством микрометрического устройства 22, с помощью которого можно измерить величину удлинения пружины. Мерой изменения напряженности поля силы тяжести является число оборотов микрометрического винта, измеряемое отсчетным устройством.

2.2. Система нивелирования

Система нивелирования (см. рис. 2.3) состоит из трех подъемных винтов 14 и двух цилиндрических уровней 7 и 10, оси которых расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Подъемные винты смонтированы на массивном основании из текстолита и расположены относительно друг друга, по окружности, через 120° . Уровень, ось которого параллельна линии соединяющей два подъемных винта, называется поперечным. Он контролирует горизонтальное положение нити подвеса маятника, которая параллельна оси поперечного уровня.

Уровень, ось которого расположена по направлению третьего винта, называется продольным. Его ось расположена вдоль рычага маятника. Этот уровень контролирует горизонтальное положение маятника.

Цена деления уровней 30". Уровни снабжены юстировочными винтами 11. Если один из винтов выкручивается, другой обязательно должен закручиваться. При выполнении этого условия ампула уровня в оправе жестко фиксируется, что исключает ее смещение.

Диаметр головки установочного винта (на рис. 3.3, б) – 32 мм. Поэтому длина окружности головки – 100 мм. По скошенному краю головки, по

ходу часовой стрелки, нанесены деления через 0,1 оборота винта, оцифрованные 0,1,2...9. Замечая «на глаз» с точностью до 1 мм положение делений относительно индекса на корпусе основания, можно оценить положение установочного винта с ошибкой 0,01 оборота.

Шаг установочного винта гравиметра a равен 0,75 мм. При повороте винта, контролирующего продольный уровень, на один оборот гравиметр наклоняется относительно вертикальной оси на угол около $20'$, т. е. цена оборота установочного винта продольного уровня $C_{пр}$ равна $20'$. Фиксируя положение винта с точностью до 0,01 оборота, можно определить наклон гравиметра вдоль продольного уровня с ошибкой около $0,2'$ или $12''$.

Наклон гравиметра вдоль оси поперечного уровня 4 в вертикальной плоскости, параллельной оси вращения маятника 5 упругой системы, производится одновременным вращением обоих винтов 3 и 6 поперечного уровня в противоположных направлениях. Цена оборота подъемного винта поперечного уровня $C_{пн}$ равна $35'$:

$$C_{пн} = C_{пр} \times \operatorname{tg} 30^\circ = 20' \times 1,73 = 35'.$$

Фиксируя положение каждого из двух винтов с точностью 0,01 оборота, можно определить наклон гравиметра вдоль поперечного уровня с ошибкой около $0,35' \cdot \sqrt{2} = 30''$.

При высокоточных измерениях силы тяжести необходимо следить за тем, чтобы при нивелировании гравиметра его высота не менялась более чем на 3 мм, что соответствует изменению силы тяжести примерно на 1 мкГал. Обычно прибор нивелируют двумя подъемными винтами при неподвижном третьем.

2.3. Электрическая система

Система состоит из источника электропитания, электрической лампочки, электрического кабеля и системы подключения электроэнергии.

В качестве источника электропитания используются или щелочные аккумуляторы типа СГД-5 емкостью 10 ампер-часов, или плоские батареи для карманного фонаря с выходным напряжением 4,5 В. Для увеличения емкости обычно составляют блок из двух-трех батарей, соединенных параллельно.

Источником света является электрическая лампочка напряжением 2,5 или 3,5 В и током 0,15–0,25 А. Спираль у лампочки должна быть по цен-

тру колбы (с «центральной волоском»). Подвод электропитания происходит с помощью двухжильного провода с виниловой изоляцией. На верхней панели гравиметра имеется миниатюрная розетка для подключения вилки с электрическим кабелем 8 (см. рис. 2.4).

Длина электрического кабеля зависит от расстояния до источника электропитания и обычно равна 50–100 см.

2.4. Оптическая система

Оптическая система гравиметра (рис. 2.6) состоит из конденсора 2, создающего равномерное распределение светового потока от электрической лампочки 1, стеклянной призмы 3, обеспечивающей поворот светового луча на 180° , объектива 4 с фокусным расстоянием около 30 см и окуляра 5 с увеличением 20 крат, позволяющего рассматривать изображение индекса маятника 6 на окулярной шкале 7.

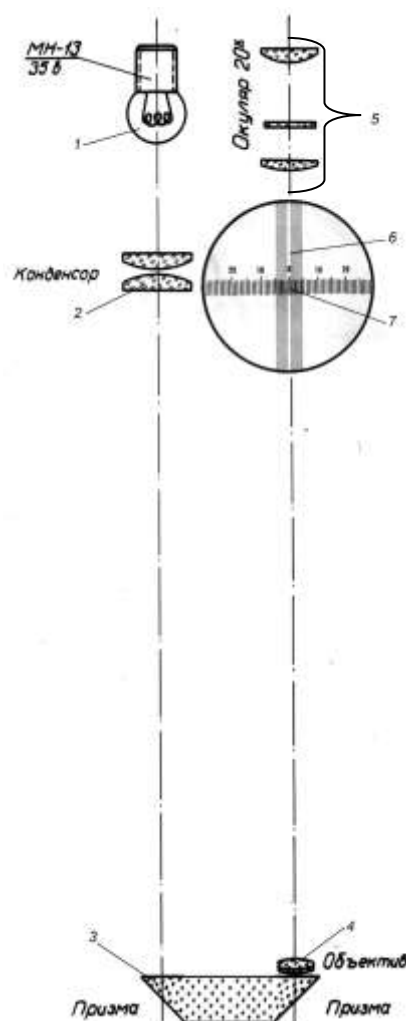


Рис 2.6. Оптическая схема гравиметра

Окулярная шкала выполнена на стеклянной пластинке, помещенной в фокусе окуляра. Истинное расстояние между штрихами окулярной шкалы 0,1 мм, а видимое, при увеличении окуляра 20 крат, – 2 мм. Деления шкалы оцифрованы: центральный штрих – 0, а каждый десятый штрих влево и вправо от нулевого цифрами 10, 20, 30.

2.5. Измерительная система

Система предназначена для определения величины отклонения маятника от горизонтального положения под действием силы тяжести.

Основной частью измерительного устройства является микрометрический винт 11 (см. рис 2.3), который одним концом связан с подвижным штоком 38, а другим – с отсчетным устройством 7. С подвижным штоком микровинт связан через шарик 14. Постоянный контакт между ними обеспечивается люфтовывбирающей пружиной 42.

Измерительная пружина кварцевой системы 2 (см. рис 2.5) одним концом прикреплена к кварцевому стержню 20, который запрессован в металлический подвижный шток 38. Изменением натяжения пружины маятник упругой системы приводится в горизонтальное положение. Величина угла поворота микрометрического винта является мерой изменения силы тяжести, которая определяется счетчиком (рис. 2.7).

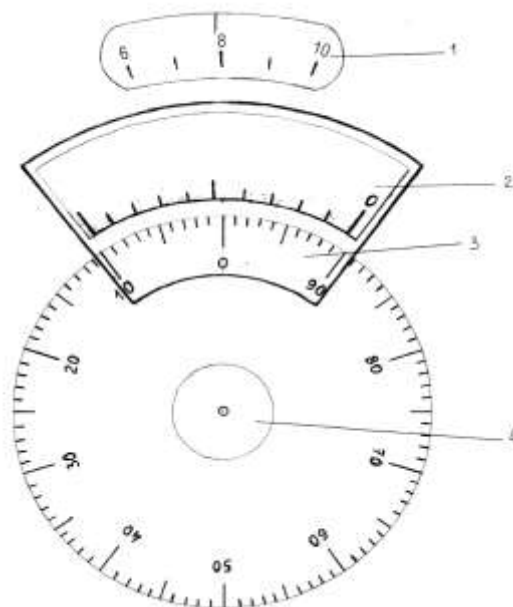


Рис. 2.7. Отсчетное устройство гравиметра

Счетчик состоит из 3-х дисков. На первом диске 1 нанесены штрихи, пронумерованные через один четными цифрами. По нему отсчитываются целые обороты микровинта относительно отсчетного индекса 5. Если, например, отсчетный индекс находится между цифрами 7 и 8, то следует записывать семь оборотов. Шкала оборотов имеет 15 делений.

На другом (основном) диске 3, соединенном с микровинтом 4, нанесено 100 делений. Каждый пятый штрих удлинен. Каждое десятое деление подписано цифрами от 0 до 90. Подписи делений «идут» против часовой стрелки. По этой шкале снимаются десятые и сотые доли оборота микровинта. При этом, отсчетным индексом является нулевой штрих третьей шкалы – нониуса 2. По ней снимаются тысячные доли оборота. Шкала имеет 10 делений. Пятый штрих длиннее остальных. Длина шкалы равна 19 делениям основной шкалы. Тысячная доля оборота соответствует порядковому номеру штриха шкалы-нониуса, который точно совпал с каким либо делением основной шкалы. Снятие тысячных долей оборота микровинта аналогично снятию десятых долей миллиметра на штангенциркуле. Если нулевой штрих шкалы расположен например, между 90 и 91 штрихом основной шкалы, то следует записать 90 сотых. Пример снятия отсчета по шкале гравиметра приведен на рис. 2.7: отсчет по гравиметру равен 7,909 оборота.

Микровинт имеет шаг (расстояние между витками резьбы) 0,5 мм. Погрешность микрометрического винта, как правило, не превышает 10 микрон ($1 \text{ мк} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$).

Жесткость измерительной пружины подбирается такая, чтобы один оборот микровинта, перемещающегося на 0,5 мм, соответствовал изменению силы тяжести на 6–8 мГал. Полный ход микровинта 7,5 мм (15 оборотов), что соответствует диапазону измерения силы тяжести без перестройки 90–120 мГал.

2.6. Диапазонная система

Система служит для перестройки диапазона измерения силы тяжести на другой интервал, допустим от 100 до 200 мГал. Устройство состоит из диапазонной пружины 3 (см. рис. 2.5), нижний конец которой прикреплен к заднему отростку рычага маятника 26, а верхний приварен к подвижному штоку диапазонного винта 21. Жесткость диапазонной пружины в 50–80 раз

больше жесткости измерительной. Она такова, что перемещение штока на 0,5 мм (на один оборот) соответствует изменению силы тяжести на 200–300 мГал. Полный ход винта 5–7 мм. Таким образом, изменение полного диапазона измерения силы тяжести будет составлять 2 000–3 000 мГал. Подвижный шток имеет в верхней части шлиц под отвертку, с помощью которой перестраивается диапазон измерения силы тяжести. Например, если изображение маятника «ушло» в левую (тяжелую) сторону, то диапазонный винт необходимо вращать против часовой стрелки, т. е. винт надо вращать всегда в ту сторону, где находится маятник.

Для обеспечения герметичности корпуса упругой системы подвижные штоки измерительного и диапазонного устройств заключены в сильфоны 30 (см. рис. 2.4), представляющие собой гофрированные металлические цилиндры, способные сжиматься и растягиваться, обеспечивая при этом вакуум в объеме, где находится упругая система. Сильфон припаивается к корпусу микрометрического и диапазонного винтов. Общее удлинение сильфона при растяжении и сжатии пружины – около 12 мм.

2.7. Вакуумное устройство

Для исключения влияния давления воздуха и температуры на показание гравиметра, из объема, в котором находится кварцевая чувствительная система, откачивается воздух. Откачивание воздуха производят вакуумным насосом через вакуумный кран (рис. 2.8).

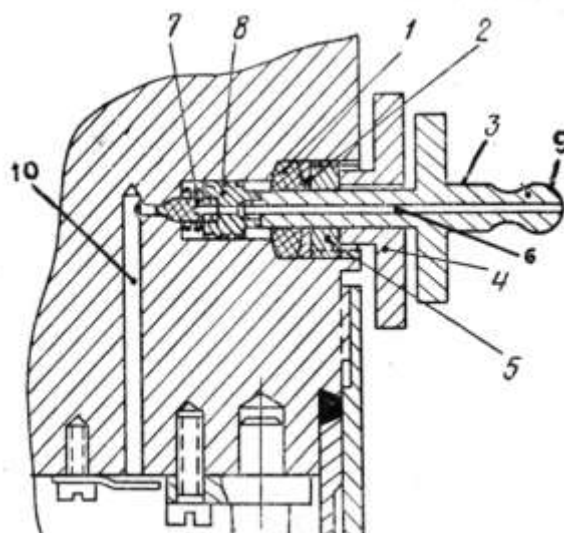


Рис. 2.8. Вакуумное устройство (вертикальный разрез)

Вакуумный кран расположен на боковой поверхности основания корпуса кварцевой системы. При откачивании воздуха применяют вакуумный ключ, состоящий из двух частей: внешней 4 и внутренней 3. Ключом 4 отпускается гайка 5, затем в отверстие гайки 5 металлической шайбы 2 и резиновой шайбы 1 вставляется ключ 3, так, чтобы он вошел в шлиц гайки 8. Ключ 3 имеет сквозное отверстие 6. Если повернуть ключ 3 против часовой стрелки, то откроется отверстие, закрываемое иглой 7, и герметическая камера через канал 10 соединится с атмосферой. На штуцер 9 ключа 3 надевается шланг из вакуумной резины, соединенный через манометр с вакуумным насосом. Чтобы воздух не смог проникнуть в герметичную камеру между ключом 3 и прокладкой 1, ключом 4 затягивают гайку 5. Затем ключ 3 поворачивают по часовой стрелке до упора. С помощью ключа 4 отпускается гайка 5 и после этого вынимается ключ 3. Остаточное давление в герметизированном корпусе составляет 1–3 мм рт. ст. (133,3–399,9 Па). Таким образом, вакуумное устройство позволяет откачать воздух из герметичной камеры без разборки средней части гравиметра.

2.8. Термостатирование гравиметра

Под действием температуры изменяются параметры пружин и нитей подвеса маятника, что приводит к кажущемуся изменению силы тяжести. Чтобы исключить влияние температуры на показания прибора, необходимо поместить упругую систему гравиметра в термостат-устройство, поддерживающее постоянную температуру в объеме, где находится чувствительная система. В практике гравиметрических работ применяют или активное или пассивное термостатирование.

Активное термостатирование (рис. 2.9) применяется в маятниковых приборах, в гравиметре ГАГ-2 и, обычно, в гравиметрах с металлической упругой системой. При этом увеличивается вес приборов.

В гравиметрах типа ГНУ-К выполняется пассивное термостатирование. В качестве пассивного термостата используется сосуд Дьюара – стеклянная колба с двойными стенками, из пространства между которыми откачан воздух (рис. 2.10). Толщина стенок – не менее 0,8 мм.

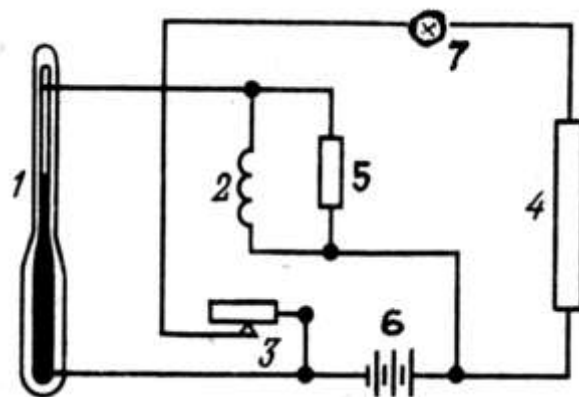


Рис. 2.9. Схема активного термостата

1 – ртутный контактный термометр; 2 – электромагнит; 3 – якорь электромагнита, 4 – термopечь, 5 – искрогаситель; 6 – батарея электропитания; 7 – сигнальная лампочка



Рис. 2.10. Сосуд Дьюара

Качество сосуда Дьюара определяется отражательной способностью его стенок, теплопроводностью их и слоя остаточного воздуха между стенками. Хорошее покрытие характеризуется коэффициентом отражения 0,95–0,97. Из объема, где находится чувствительная система, откачан воздух. Отсутствие молекул воздуха препятствует передаче тепловой энергии. Остаточное давление воздуха – около $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Дальнейшее разрежение, начиная с вакуума $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст., мало снижает теплопроводность.

В качестве теплоизоляторов в гравиметре выступают также цилиндр из пенопласта и шерстяной чехол, одеваемый на внутренний корпус гравиметра.

Кроме того, верхний кожух гравиметра имеет зеркальную поверхность, которая отражает солнечные лучи (см. рис. 2.2). Внутренняя поверхность футляра транспортировочного ящика покрыта поролоном. Остаточный температурный эффект исключается температурным компенсатором чувствительной системы гравиметра. Изменение температуры внутри гравиметра фиксируют ртутным термометром с ценой деления $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.