

Институт проблем машиноведения РАН
СПб. Государственный Университет
Всероссийский НИИ метрологии им. Д. И. Менделеева
Балтийский государственный технический университет
им. Д. Ф. Устинова

Научный совет по метрологическому обеспечению
и стандартизации РАН

Научный совет по проблемам физической метрологии
Северо-Западного отделения Метрологической академии РФ

ФИЗИЧЕСКАЯ МЕТРОЛОГИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ

Под редакцией
доктора технических наук
Городецкого А. Е.
и
кандидата физико-математических наук
Курбанова В. Г.

Санкт-Петербург
Издательство КН
1996

О ПРИРОДЕ ОШИБОК ИЗМЕРЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ РТУТНЫМ БАРОМЕТРОМ

Г. В. Кирьян, Д. Г. Кирьян *

В астрономии и геодезии, использующих современные оптические инструменты, остро стоит проблема вычисления атмосферной рефракции (или поправки за рефракцию) с точностью 0,01" дуги и выше. Известны сформулированные G. Teleki [2], условия, при которых показатель преломления n может быть вычислен с точностью 10^{-8} . Однако, несмотря на все усилия специалистов, достигнуть такой точности вычисления n не удастся. Одной из причин является некорректность метода учета массы атмосферного столба в точке наблюдения. В настоящей работе рассмотрена природа ошибок, присущих ртутному барометру.

Специалисты ряда областей науки и техники используют величину измеренного атмосферного давления для решения своих профессиональных задач. Так астрономы, геодезисты, геофизики величину атмосферного давления, в точке наблюдения, используют для расчета атмосферной рефракции и вычисления поправок координат наблюдаемого источника света, используют для исследования атмосферной рефракции, как физического явления и т. д. За 350 лет измерение атмосферного давления стало привычным.

Атмосферное давление — это силовое воздействие совокупной массы молекул вещества атмосферы, находящихся в реальном температурном и гравитационном поле, на элементарную площадку.

Метеорологи и метрологи, профессионально владеющие методами измерения атмосферного давления, утверждают, что точные измерения давления следует производить только ртутным барометром, а показания иных приборов, таких как anerоиды, используют для регистрации тенденций в изменении давления. В каждой из развитых стран метрологические службы имеют эталонные ртутные барометры, по которым сверяют показания других барометров, как ртутных, так и anerоидных.

Попробуем разобраться, какие факторы и физические процессы определяют точность измерений атмосферного давления ртутным барометром и к каким ошибкам приводит использование показаний ртутного барометра.

* Редколлегия считает некоторые положения статьи спорными. Статья публикуется в дискуссионном порядке.

Рассмотрим схему классического сифонного ртутного барометра (рис. 1а). В основе действия прибора — баланс сил. Одна сила P_1 действует со стороны столба атмосферы, другая — P_2 действует со стороны столба ртути. Состоянию равновесия соответствует равенство сил:

$$P_1 = P_2, P_1 = m_1 g_1, P_2 = m_2 g_2, \quad (1)$$

где m_1, m_2 — массы атмосферного и ртутного столбов соответственно; g_1, g_2 — ускорение свободного падения в точках центров масс столбов воздуха и ртути соответственно. Из равенства сил следует:

$$m_1 g_1 = m_2 g_2. \quad (2)$$

Из (2) видно, что $m_1 \neq m_2$, так как g_1 не равно g_2 . Это справедливо потому, что центры масс столбов ртути и атмосферы находятся на существенно различных высотах. Для проверки соотношения $m_1 \neq m_2$ вычислим, как пример, m_1 для случая статичной, стандартной атмосферы Земли и m_2 для ртути. Столб ртути высотой

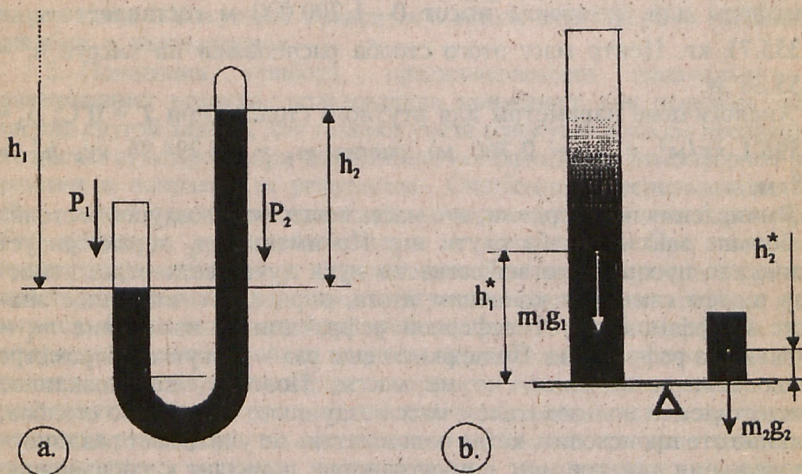


Рис. 1. Ртутный барометр

h_2 уравнивается столбом атмосферного воздуха высотой h_1 . Так как центры масс этих столбов находятся на различной высоте, а ускорение свободного падения g есть функция высоты h , то вводим обозначение $g_1 = g(h_1^*)$, $g_2 = g(h_2^*)$. Здесь h_1^*, h_2^* — высоты, на которых расположены центры масс атмосферного и ртутного столбов (рис. 1б). Далее полагаем, что поперечные сечения (S) ртутного и атмосферного столбов равны 1 м^2 . Используя принятые для стандартной

атмосферы Земли соотношения и закономерности $\rho(h)$, $g(h)$, вычислим m_1 и h_1^*

$$m_1 = \int_0^{h_1} dm = \int_0^{h_1} \rho(h) dh, \quad (3)$$

где

$$\rho(h) = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{\rho_0 g(h) h}{P_0}\right), \quad g(h) = g_0 \cdot \frac{R_0^2}{(R_0 + h)^2}. \quad (4)$$

Центр масс атмосферного столба:

$$h_1^* = \frac{1}{m_1} \cdot \int_0^{h_1} h \rho(h) dh \quad (5)$$

где $\rho(h)$ — плотность [кг/м³]. Вычисленная масса столба стандартной атмосферы для интервала высот 0—1,200.000 м составляет $m_1 = 10,355.71$ кг. Центр масс этого столба расположен на высоте $h_1^* = 7,355.38$ м.

Аналогичные параметры для ртутного столба (при $T = 0^\circ\text{C}$; $\rho_2 = 13,595.1$ кг/м³ и $h_2 = 0,760$ м) равны $m_2 = 10,294.96$ кг, $h_2^* = 0,38$ м.

Вычисления подтвердили, что масса вещества в воздушном столбе m_1 больше массы столба ртути m_2 . Но именно m_1 характеризует количество прозрачного вещества на пути луча света через атмосферу и, тем самым, в конечном итоге, определяет численное значение коэффициента атмосферной рефракции, а изменение m_1 — поправку за рефракцию. Подчеркнем еще раз — в ртутном барометре уравниваются силы, но не массы. Поэтому, не осознанное отождествление пользователем масс воздушного и ртутного столбов, а именно это происходит, когда пользователь не учитывает различного положения центров масс в пространстве, приводит к уменьшению массы атмосферного столба и, в итоге, к появлению большой ошибки при вычислении атмосферной рефракции. Ошибку в определении m_1 для нашего примера со стандартной атмосферой можно исправить внесением поправки в измеренное давление через табличный множитель g_1/g_2 (для стандартной атмосферы — 760 мм рт. ст., при нормальных условиях, эта поправка равна +4,48 мм рт. ст.). После введения поправки, по давлению, можно вычислить коэффициент атмосферной рефракции, но напоминаем, для стандартной статичной атмосферы. Для использования в вычислениях измеренной величины давления реальной атмосферы, каждое измерение атмосферного давления должно сопровождаться одномомент-

ными измерениями g_1 и g_2 потому, что эти величины во времени не постоянны.

В заключение отметим:

1. Ртутный барометр был создан естествоиспытателем Е. Torricelli [1] в до Ньютоновскую эпоху (1642 год) для доказательства того, что воздух имеет вес. Взвешивание воздуха было произведено в воздушной же среде, изящно и в высшей степени убедительно. В дальнейшем, случилось так, что трубку торичелли (барометрическую трубку), без каких-либо оговорок, стали использовать для решения совершенно другой задачи — по изменению давления атмосферы вычислять изменение коэффициента атмосферной рефракции, оставляя без внимания тот факт, что по показаниям ртутного барометра нельзя судить о точном изменении массы прозрачного вещества атмосферы.

2. Пользователь пренебрегает фактом неравенства g_1 и g_2 для центров масс уравновешенных столбов, а это адекватно отождествлению масс столбов атмосферы и ртути и, тем самым, ведет к занижению совокупной прозрачной массы атмосферы и появлению ошибок в вычислениях.

3. Показания прибора, предназначенного изначально для взвешивания воздуха, пользователь применяет для решения совершенно другой задачи, для точного учета совокупной массы прозрачного вещества атмосферы при вычислении коэффициента атмосферной рефракции и поправок за рефракцию. Ошибочность использования для этих целей величины давления, измеренного ртутным барометром, без поправки g_1/g_2 , заключается в следующем. При изменении гравитационного поля, в окружающем Землю пространстве противодействующие силы, со стороны ртутного столба и атмосферы изменяются. Изменяются не пропорционально. В отсчет величины атмосферного давления войдет разность противодействующих сил. Измеренное давление атмосферы отразит эту разность. По логике пользователя, с изменением давления совокупная масса прозрачного вещества атмосферы так же изменится. Но на самом деле изменений в количестве молекул и их качестве не произошло и масса воздушного столба фактически осталась неизменной.

То, что эти факторы ускользали от внимания естествоиспытателей и ученых в течение 350 лет, можно характеризовать, по-видимому, как некий казус, так как все изложенное является очевидным.

Благодарности:

Авторы благодарят Зинаеву Н. Я. за постоянную поддержку и помощь в работе.

Литература

1. Фламарион К. Атмосфера; Книгоиздательство П. П. Сойкина, С.-Петербург.
2. Teleki G. Physical and meteorological factors connected with astronomical refraction. Publ. Observ. Astron. Beograd, 1974. 18. p. 213—234.