УДК 528.56

Ю. Ф. СТУСЬ

(Новосибирск)

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНОГО ГАЗА В БАЛЛИСТИЧЕСКОМ ЛАЗЕРНОМ ГРАВИМЕТРЕ

При измерениях абсолютного значения ускорения силы тяжести баллистическим методом влияние силы сопротивления уменьшают вакуумированием объема, в котором падает пробная масса. В настоящее время существует большой выбор откачных средств, обеспечивающих сверхвысокий вакуум. Однако не все они могут быть использованы в транспортабельном гравиметре, поскольку такие насосы, как геттерные, цеолитовые, магниторазрядные и им подобные, могут эффективно работать практически лишь в стационарных лабораторных условиях, т. е. там, где есть условия для периодической чистки насоса и регенерации активного элемента. При транспортировке гравиметра требуется расчленение его на отдельные блоки, что может приводить к загрязнению как откачиваемого объема, так и насоса и, следовательно, оказывать решающее влияние на его работоспособность. Поскольку профилактика и восстановление активных элементов указанных выше насосов в экспедиционных условиях практически невозможны, то и выбор откачных средств существенно ограничивается. Кроме того, для транспортабельного гравиметра большую роль играют такие факторы, как быстрота получения требуемого вакуума, габариты и вес откачных средств, потребляемая энергия и т. д. В связи с этим большое значение приобретает анализ способов уменьшения влияния силы сопротивления на точность определения ускорения силы тяжести. Ниже рассматривается ряд способов, позволяющих существенно уменьшить абсолютную погрешность измерений при достигнутой степени вакуумирования объема, в котором движется пробная масса.

Общего решения задачи о нахождении силы сопротивления, действующей на тело в разреженном газе, не существует, поскольку механизм взаимодействия тела с газом в значительной степени зависит от параметров газовой среды. Обычно различают три режима течения газового потока: свободномолекулярный, переходный и режим со скольжением [1]. Как показывают оценки и экспериментальные данные [1, 2], уже при давлениях порядка 10^{-1}—10^{-2} Па режим обтекания тела становится свободномолекулярным. Достижение такой степени вакуумирования не представляет никаких проблем и является обязательным при интерферометрических измерениях для устранения влияния показателя преломления воздуха на точность отсчета расстояний. Поэтому в дальнейшем будем предполагать режим обтекания тела свободномолекулярным. Он в настоящее время изучен достаточно хорошо, что позволяет определить характер действующей силы и достаточно надежно оценить ее величину.

Для свободномолекулярного режима обтекания тела в [2] была найдена зависимость силы сопротивления F_c от скорости движения пробной массы v:

$$F_с = \rho v_{вер}[(4+\pi)S_н + S_{бок}]v/2\sqrt{\pi},$$

Здесь ρ — плотность газа; $v_{вер}$ — средневероятная скорость молекул газа; $S_н$ — площадь поверхности пробной массы, спроецированная на плоскость, нормальную к направлению движения; $S_{бок}$ — площадь пробной массы, спроецированная на направление движения.

Учитывая, что давление связано с плотностью газа соотношением $P = \rho v_{\text{вер}}^2/2$, выражение для F_c можно переписать в виде

$$F_c = \alpha P v, \tag{1}$$

где $\alpha = [(4+\pi)S_{\text{н}} + S_{\text{бок}}]/\sqrt{\pi} v_{\text{вер}}$. Там же в [2] приведены оценки влияния этой силы на погрешность определения для одного из вариантов баллистического гравиметра, которые хорошо согласуются с полученными на нем экспериментальными данными. Так, при давлении 10^{-4} Па эта погрешность составляет около 10^{-8} от полного значения ускорения силы тяжести.

Если пренебречь градиентом силы тяжести, величину которого необходимо знать только для привязки полученного значения ускорения силы тяжести к некоторому наперед заданному уровню, например к уровню пола, то уравнение движения тела с учетом силы сопротивления можно записать в виде

$$m\ddot{z} = mg - \alpha P v. \tag{2}$$

Здесь $\ddot{z}$ — ускорение движения пробной массы под действием силы тяжести и силы сопротивления $\alpha P v$.

Если газ внутри вакуумированного объема неподвижен, т. е. отсутствуют газовые потоки, v в (2) можно заменить на $\dot{z}$ и с учетом малости силы сопротивления по сравнению с силой тяжести его решение можно записать в виде

$$z = gt^2/2 + v_0 t - (\alpha P/2m)t^2[v_0 + gt/3]. \tag{3}$$

При условии, что величина $\alpha P/m$ известна, для определения g достаточно провести отсчет пути и времени на двух интервалах движения. Если начала интервалов совпадают (метод трех станций), то получим два уравнения

$$z_i = g\frac{t_i^2}{2} + v_0 t_i - \frac{\alpha P}{2m}\ t_i^2\left(v_0 + \frac{1}{3}\,g t_i\right), \tag{4}$$

где $i = 1,\ 2$ — индекс, указывающий, к какому интервалу движения относятся измеренные величины пути и времени.

Для упрощения вычислений при решении системы (4) вместо v_0 и g, стоящих в круглых скобках, можно использовать их приближенные значения v_0' и g', полученные, например, из решения (4) без учета силы сопротивления:

$$g' = (z_2/t_2 - z_1/t_1)2/(t_2 - t_1), \tag{5}$$

$$v_0' = \left(\frac{z_1}{t_1^2} - \frac{z_2}{t_2^2}\right)\frac{t_2 t_1}{t_2 - t_1}. \tag{6}$$

С учетом (5) и (6) решение (4) относительно g можно записать так:

$$g = g' + \alpha P\left[v_0' + g'(t_1 + t_2)/3\right]/m. \tag{7}$$

По сути дела, g' представляет собой измеренное значение ускорения пробной массы под действием как силы тяжести, так и силы сопротивления, а второй член, стоящий в правой части уравнения (7), является поправкой к нему для получения действительного значения ускорения силы тяжести. Поскольку величины v_0', g', t_1 и t_2 мало меняются в процессе измерений (их первые три-четыре значащих цифры практически постоянны), то из (7) можно получить

$$g = g' + KP, \tag{8}$$

где $K = (\alpha/m)\left[v_0' + g'(t_1 + t_2)/3\right]$ — константа, характерная для данной аппаратуры. Из (8) следует, что поправка на силу сопротивления может быть найдена экспериментально. Действительно, проводя измерения при двух различных значениях давления газа, получаем систему уравнений

$$\begin{cases} g = g' + KP', \\ g = g'' + KP'', \end{cases}$$

откуда

$$K = -(g'' - g')/(p'' - p'). \qquad (9)$$

Эту процедуру для определения K достаточно провести лишь один раз, и в дальнейшем использовать это значение для внесения соответствующей поправки на давление остаточного газа в камере в измеренное значение ускорения пробной массы. Причем если по каким-либо причинам величины v_0', g', t_1 и t_2 значительно изменились, то новое значение K может быть получено простым пересчетом, если, конечно, конструкция пробной массы не изменилась, т. е. величина α/m осталась той же самой.

Этот метод использовался нами при измерениях абсолютного значения ускорения силы тяжести аппаратурой, описанной в [3], что позволило применить для откачки камеры обычный диффузионный насос типа Н-5С и отказаться от ловушки, охлаждаемой жидким воздухом. Этот насос позволял нам в экспедиционных условиях получать вакуум с остаточным давлением газа в камере около $2 \div 3 \cdot 10^{-4}$ Па. При этих условиях систематическая погрешность измерения абсолютного значения ускорения силы тяжести из-за силы сопротивления составила бы около 30—40 мкГал ($3 \div 4 \cdot 10^{-7}$ м/с²). Экстраполяция на нулевое давление позволяла уменьшать эту погрешность до величин около $5 \div 8$ мкГал. Дальнейшее ее уменьшение ограничивалось в основном несовершенством аппаратуры, применявшейся нами для определения давления остаточного газа в камере.

Возможен и другой способ уменьшения влияния силы сопротивления, основанный на том обстоятельстве, что она прямо пропорциональна скорости движения тела и, следовательно, при разных скоростях движения вклад ее различен. Этот метод легко реализовать путем варьирования интервала времени между моментом отпускания тела и началом отсчета интервалов пути и времени. Фактически это приведет к изменению начальной скорости падения тела и, как следствие, средней скорости его движения на измеряемых интервалах.

После проведения измерений при двух различных начальных скоростях движения пробной массы для определения g получим систему из двух уравнений

$$\begin{cases} g = g' + \dfrac{\alpha P}{m}\left[v_0' + \dfrac{1}{3} g' \left(t_1' + t_2'\right)\right], \\ g = g'' + \dfrac{\alpha P}{m}\left[v_0'' + \dfrac{1}{3} g'' \left(t_1'' + t_2''\right)\right], \end{cases} \qquad (10)$$

откуда

$$\frac{\alpha P}{m} = -\frac{g'' - g'}{\left\{v_0'' - v_0' + \dfrac{1}{3}\left[g''\left(t_1'' + t_2''\right) - g'\left(t_1' + t_2'\right)\right]\right\}}. \qquad (11)$$

К недостаткам этого способа следует отнести бóльшую по сравнению с предыдущим чувствительность к случайным ошибкам в определении g' и g''. Действительно, в то время как величину давления для определения поправки к g' можно изменять в десятки и даже сотни раз, получать значительные изменения средней скорости движения без потерь в точности определения g' или g'' практически невозможно. Однако этот метод может оказаться полезным в комплексе с предыдущим при оценке действительной погрешности определения абсолютного значения силы тяжести. Кроме того, этот способ может быть более предпочтительным для тех случаев, когда по каким-либо причинам нет возможности получить вакуум с давлениями ниже 10^{-2} Па, т. е. когда первый способ малоэффективен либо из-за низкой точности определения давления, либо при несоблюдении условия свободномолекулярного режима. Дело в том, что, как показывают теория и эксперимент [1, 2], основной вклад в сопротивление движению практически при любых давлениях вносят силы, пропорциональные первой степени скорости движения. Основным условием применимости этого метода является поддержание на постоянном уровне давления в камере. Отметим попутно, что возможности этого метода не ограничиваются только выявлением сил, действующих на пробную массу со стороны остаточного газа. Он может быть использован для обнаружения и других сил, в частности электромагнитных, у которых в той или иной степени выражена зависимость от скорости или положения пробной массы.

При рассмотрении приведенных выше методов предполагалось, что движение газа в вакуумированном объеме отсутствует. Однако для поддержания давления газа на постоянном или близком к постоянному уровне необходимо проводить непрерывную откачку газа, поступающего в объем за счет газовыделения с внутренней поверхности камеры и с поверхности деталей аппаратуры, расположенных внутри камеры.

Как известно, время откачки камеры от некоторого исходного давления P_1 до давления P_2 определяется выражением [4]

$$t = -\frac{\overline{V}}{S_0}\int\limits_{P_1}^{P_2}\frac{dP}{P - Q'_\Sigma/S_0},$$

где $\overline{V}$ — приведенный объем камеры; S_0 — эффективная быстрота откачки; Q'_Σ — количество газа, поступающего в камеру в единицу времени за счет газовыделения и натекания извне.

Если величина Q'_Σ/S_0 в процессе откачки не меняется, то

$$t = \frac{\overline{V}}{S_0}\ln\frac{P_1 - Q'_\Sigma/S_0}{P_2 - Q'_\Sigma/S_0}.$$

При быстроте откачки $S_0 = 0{,}1$ м^3/с и отсутствии газовыделения для снижения давления в камере объемом $\overline{V} = 0{,}02$ м^3 с уровня 10^{-2} до 10^{-4} Па потребовалось бы $t = (0{,}02/0{,}1)\ln 10^2 = 0{,}92$ с.

В реальных же условиях на это требуется, как правило, несколько часов. Более того, уменьшение давления в камере, начиная с некоторого значения, происходит практически только за счет уменьшения в процессе откачки величины газовыделения. Поэтому поток газа в камере характеризуется в основном величиной газовыделения и натекания газа извне. Скорость течения газа через произвольное сечение камеры определяется давлением газа P, его потоком Q_S в этом сечении и площадью сечения S: $v_г = Q_S/PS$.

Определить скорость газового потока для произвольного сечения затруднительно, однако существует способ, позволяющий оценить ее максимальное значение по величине натекания газа в откачиваемый объем (метод накопления [4]). Для этого камеру перекрывают от насоса на фиксированное время Δt. В отсоединенной части с известным объемом V вследствие газовыделения или притока газа извне давление увеличится на величину ΔP, а количество газа возрастет на ΔPV. Тогда максимальная величина газового потока составит $Q_{max} = \Delta PV/\Delta t$. Максимальная величина скорости газа внутри камеры при давлении P будет

$$v_{г\,max} \leqslant Q_{max}/PS_{min},$$

где S_{min} — площадь минимального сечения камеры. Так, например, для камеры с постоянным сечением по всей длине площадью $S = 0{,}01$ м^2 и объемом $V = 0{,}01$ м^3 при натекании $\Delta P/\Delta t = 5\cdot 10^{-5}$ Па/с и $P = 2\cdot 10^{-4}$ Па скорость газового потока может достигать величины $v_{г\,max} =$

$= 5 \cdot 10^{-5} \cdot 0{,}01/2 \cdot 10^{-4} \cdot 0{,}01$ м/с $= 0{,}25$ м/с. Средняя скорость движения пробной массы на интервале падения около метра примерно на порядок больше, и, следовательно, погрешность определения поправки к g' при этих условиях приведенными выше методами не будет превышать 10% от ее полной величины, что соответствует погрешности измерений при разрежении на порядок выше. В то же время при увеличении $\Delta P/\Delta t$ увеличивается и погрешность определения поправки. Следовательно, для определения границ применимости изложенных выше методов уменьшения влияния силы сопротивления на точность определения абсолютной величины ускорения силы тяжести необходимо проводить измерения максимальной величины газового потока в вакуумируемом объеме.

Вообще говоря, в действительности ограничения на применимость указанных выше способов накладывают не столько газовые потоки, сколько несовершенство аппаратуры, которая обычно применяется при измерении давления в первом методе, и случайные погрешности измерения интервалов пути и времени — во втором. Дело в том, что при хорошей герметизации камеры газовый поток образуется только за счет газовыделения, величина которого, как правило, экспоненциально убывает с увеличением времени откачки, а состояние равновесия между количеством газа, выделяющегося в объем и откачиваемого из него, достигается вблизи давлений, достаточно близких к предельному для данного типа насоса, т. е. в области, где эффективная быстрота откачки мала. Вследствие этого количество газа, откачиваемого в единицу времени, становится значительно меньше его количества, находящегося в камере. Поэтому и максимальная скорость газового потока внутри камеры становится малой. Так, например, для аппаратуры, описанной в [3], эта скорость во время проведения измерений составляет менее 10% от средней скорости движения пробной массы.

Если электронно-счетный блок позволяет проводить измерения пути и времени на трех интервалах движения, то для определения вклада силы сопротивления можно обойтись без варьирования величины давления газа в камере и начальной скорости движения. Действительно, для нахождения неизвестных g, v_0 и $\alpha P/m$ достаточно решить систему уравнений

$$z_i = v_0 t_i + \frac{1}{2} g t_i^2 + \frac{\alpha P}{2m}\left(v_0 + \frac{1}{3} g t_i\right) t_i^2, \tag{12}$$

где $i = 1, 2, 3$. Вместо v_0 и g в членах, описывающих вклад силы сопротивления, как и ранее, можно использовать их приближенные значения $\bar v_0$ и $\bar g$. Решив относительно g 1-е и 3-е и соответственно 2-е и 3-е уравнения этой системы, приведем ее к виду

$$\begin{aligned} g &= g_{1-3} + \frac{\alpha P}{m}\left[\bar v_0 + \frac{1}{3}\bar g\,(t_1 + t_3)\right], \\ g &= g_{2-3} + \frac{\alpha P}{m}\left[\bar v_0 + \frac{1}{3}\bar g\,(t_2 + t_3)\right]. \end{aligned} \tag{13}$$

Здесь g_{1-3}, g_{2-3} — величины, аналогичные (5), полученные путем решения 1-го и 3-го уравнений и 2-го и 3-го соответственно. Откуда

$$\alpha P/m = -3(g_{2-3} - g_{1-3})/\bar g(t_2 - t_1). \tag{14}$$

Такой метод может быть развит на большее число неизвестных, входящих в выражение, описывающее движение пробной массы. Для этого необходимо, чтобы отсчет пути и времени проводился на числе интервалов, совпадающем с числом неизвестных. Таким способом в принципе возможно выделить все составляющие результирующей силы, зависящие как от скорости движения в любой степени, так и от положения пробной массы. Для этого в уравнении движения сила, действующая на пробную массу, представляется в виде суммы рядов с постоянными коэффициентами по степеням скорости движения и координаты. Число членов разложения ограничивается лишь разрешающей способностью электронно-счетного блока гравиметра. Подробнее теория этого метода и способ решения получающихся систем уравнений рассмотрены в [5].

Несмотря на универсальность этого метода, его возможности в значительной степени ограничиваются случайными ошибками, возникающими при отсчете пути и времени, влияние которых на конечный результат резко возрастает с увеличением числа измеряемых интервалов движения. Поэтому наряду с ним имеют смысл и методы уменьшения влияния силы сопротивления, связанные с усложнением баллистического блока гравиметра. Одним из таких методов является совмещенное падение, впервые примененное для определения абсолютного значения силы тяжести П. Н. Агалецким [6]. В его экспериментах в качестве пробной массы использовалась фотопластинка, падавшая совместно с камерой, а путь, пройденный ею внутри камеры, суммировался с расстоянием, которое проходила камера. При этом степень уменьшения влияния силы сопротивления определялась скоростью перемещения пластинки относительно камеры, поскольку чем меньше ее величина, тем меньше и сила, действующая непосредственно на фотопластинку.

Аналогичный метод можно применить и в лазерном гравиметре, если рефлектор измерительного плеча интерферометра будет двигаться внутри одновременно падающей с ним камеры. Так как внутри камеры поток газа отсутствует, то уравнение движения пробной массы можно записать в виде

$$\ddot{z} = g - K_m(\dot{z} - \dot{z}_к), \tag{15}$$

где $K_m = \alpha P/m$ — коэффициент сопротивления пробной массы, $\dot{z}_к$ — скорость движения камеры.

Если камера движется в вакууме при давлении, соответствующем свободномолекулярному режиму, то скорость ее движения можно получить, продифференцировав (4):

$$\dot{z}_к = v_{0к} + gt - K_к t[v_{0к} + (1/2)gt].$$

Пренебрегая членами, содержащими произведение коэффициентов сопротивления, уравнение движения пробной массы можно записать как $\ddot{z} = g - K_m(\dot{z} - v_{0к} - gt)$, откуда

$$z = v_0 t + gt^2/2 - K_m(t^2/2)(v_0 - v_{0к}). \tag{16}$$

Здесь $(v_0 - v_{0к}) = \Delta v$ — разность скоростей движения пробной массы и камеры в момент начала отсчета. При измерениях методом трех станций абсолютное значение силы тяжести находится из соотношения

$$g = g' - K_m \Delta v, \tag{17}$$

где g' определяется так же, как и в (5).

Для обычного метода трех станций $g = g' - K_m[v_0 + g(t_1 + t_2)/3]$. Следовательно, вклад силы сопротивления при совмещенном падении уменьшается в $[v_0 + g(t_1 + t_2)/3]/\Delta v$ раз. Для оценки этого вклада или допустимых значений P и Δv можно применить любой из способов, приведенных выше.

Существует еще один метод измерений, позволяющий в значительной степени скомпенсировать влияние силы сопротивления на точность определения g. Если пробную массу подбрасывать вверх, а отсчет пути и времени производить на участках траектории движения, симметричных относительно ее вершины, то результат измерения ускорения силы тяжести при определенных условиях не будет зависеть от силы сопротивления, так как при движении вверх направление ее действия совпадает с направлением силы тяжести, а при движении вниз оно меняется на противоположное. Подробно этот способ измерений описан в [7].

Здесь отметим лишь, что в отличие от метода совмещенного падения, для которого наличие газового потока в вакуумируемом объеме не имеет значения, для симметричного метода это может привести к систематической погрешности.

Таким образом, приведенный выше анализ показывает возможность значительного снижения требований к допустимой величине давления остаточного газа в камере баллистического блока лазерного гравиметра и тем самым к выбору откачных средств, применяемых в его транспортабельном варианте.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Девиен М.** Течения и теплообмен разреженных газов.— М.: ИЛ, 1962.
2. **Арнаутов Г. П. и др.** Исследование систематических погрешностей измерения ускорения силы тяжести методом свободного падения.— В кн.: Измерение абсолютного значения гравитационного ускорения/Под ред. Ю. Е. Нестерихина. Новосибирск: изд. ИАиЭ СО АН СССР, 1972.
3. **Арнаутов Г. П. и др.** Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести лазерным баллистическим гравиметром.— Квант. электроника, 1979, т. 6, № 3.
4. **Основы** вакуумной техники.— М.: Энергия, 1975.
5. **Арнаутов Г. П., Калиш Е. Н., Стусь Ю. Ф.** Измерение ускорения свободного падения методом многих станций.— Автометрия, 1975, № 5.
6. **Агалецкий П. Н., Егоров К. Н., Марциняк А. И.** Абсолютные определения ускорения силы тяжести в пункте ВНИИМ.— В кн.: Труды ВНИИМ. М.: Стандартгиз, 1958, вып. 32 (92).
7. **Романюк В. А.** Измерение абсолютного значения ускорения силы тяжести.— Geod. Geoph. Veröff. Berlin, 1974, R. III, H. 30.

Поступила в редакцию 21 октября 1980 г.

УДК 543.51 : 681.3.004

И. А. ГАВРИКОВ, А. Ю. РЯБЧУН, Г. М. ТРУБАЧЕЕВ

(Москва)

ПРОГРАММА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ИСКРОВЫХ ФОТО-МАСС-СПЕКТРОВ

При фоторегистрации искровых масс-спектров информация о концентрации примесей в анализируемом образце содержится в нескольких сотнях пиков, расположенных на различных экспозициях масс-спектра. При ручной обработке фото-масс-спектрограмм количественный анализ характеризуется чрезмерной трудоемкостью и недостаточной точностью, поэтому создаются автоматизированные системы обработки фото-масс-спектральных данных [1—6]. Большинство известных систем рассчитано на работу в линейной области характеристической кривой фотоэмульсии [2, 5, 6], что не позволяет надежно определять малые примеси при работе с внутренним стандартом.

Рассматриваемая система создана на основе следующих аппаратурных компонентов: масс-спектрографа с двойной фокусировкой по схеме Маттауха — Герцога, микроденситометра и графического дисплея, управляемого ЭВМ М-6000. В основу алгоритма обработки спектрографических данных положен описанный Дежарденом и Муром метод, использующий аппроксимацию характеристической кривой фотоэмульсии функцией «гиперболический тангенс» [1]. И хотя этот метод нельзя назвать популярным (более распространенным представляется метод Халла [7]), однако, как показал наш опыт, он более предпочтителен по ширине диапазона определяемых концентраций, воспроизводимости и точности.