

Поразрядный анализ значения гравитационной постоянной на примере крутильных весов

Кириян Д. Г., Кириян Г. В.

*Институт Проблем Машиноведения РАН
В.О., Большой проспект 61, Санкт-Петербург, Россия, 199178
эл.адрес: diki.ipme@gmail.com*

Впервые «гравитационная постоянная» появилась более 200 лет назад и с тех самых пор идут работы по её уточнению. По материалам *Committee on Data for Science and Technology (CODATA)*, все результаты косвенных измерений «гравитационной постоянной», выполненных различными группами исследователей, объединяет постоянство двух десятичных знаков после запятой в системе СИ и непостоянство последующих десятичных знаков. Эта ситуация была рассмотрена на примере математической модели крутильных весов. В работе показано, что решение прямой задачи метрологии, а именно, нахождение необходимой точности измерения параметров крутильных весов по заданной изначально точности значения «гравитационной постоянной», объясняет сложившуюся ситуацию. Поразрядный анализ чувствительности крутильных весов и данные CODATA дают основание для предположения, что всё многообразие значений «гравитационной постоянной» получено на экспериментальных установках без соответствующего планирования заданной точности конечного результата.

1. Постановка задачи

В 1809 году Симеон Дени Пуассон (Siméon Denis Poisson) в «*Traité de mécanique*» ввёл в закон о гравитационном взаимодействии двух материальных тел множитель \mathbf{G} — «гравитационную постоянную».¹ Закон гласит, что сила гравитационного взаимодействия двух однородных сфер

¹О истории «гравитационной постоянной» подробно рассказано в книге Томилина К.А., «*Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах*» [1, pp. 106–126]

(материальных точек) прямо пропорциональна их гравитирующим² массам и обратно пропорциональна квадрату расстояния между их центрами симметрии. Со временем, в этом законе появился масштабно-размерный множитель, называемый «гравитационной постоянной».

Рассмотрим две однородные сферы с массами m^* и m в декартовой системе координат $Oxyz$ (рис. 1). Положение каждой из сфер задано

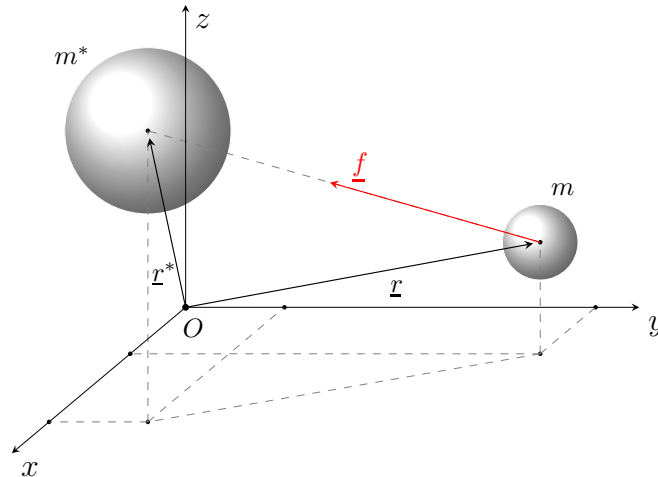


Рис. 1. Гравитационная сила \underline{f} действующая на однородную сферу с массой m со стороны однородной сферы с массой m^* .

радиус-векторами \underline{r}^* и \underline{r} . В этом случае закон о гравитационном взаимодействии, а именно гравитационная сила \underline{f} действующая на массу m со стороны m^* примет вид:

$$\underline{f} = \underline{E}(m^*, \underline{r}^* - \underline{r}) m, \quad \underline{E}(m^*, \underline{r}^* - \underline{r}) = \left(\mathbf{G} \frac{m^*}{|\underline{r}^* - \underline{r}|^2} \right) \frac{\underline{r}^* - \underline{r}}{|\underline{r}^* - \underline{r}|}. \quad (1)$$

Здесь \underline{E} — напряжённость гравитационного поля создаваемая массой m^* . Конечно, масса m так же является источником гравитационного поля и

²Понятие гравитирующей массы материального тела рассмотрено в работах [2, 3]. Если кратко, то гравитирующая масса \tilde{m} материального тела является функцией плотности окружающей её материальной среды. Функционально, выражение для гравитирующей массы выглядит следующим образом:

$$\tilde{m} = m (1 - \rho_0/\rho), \quad m > 0,$$

где ρ_0 — плотность среды; ρ — усреднённая плотность материального тела; m — гравитирующая масса тела при условии $\rho_0 = 0$, то есть при отсутствии материальной среды. Далее, слово гравитирующая применительно к массе опустим для краткости, но надо помнить, что фактор среды всегда присутствует и соответственное требует от исследователя корректного к себе отношения.

сама притягивает массу m^* с точно такой же силой, что и масса m^* притягивает m .

В настоящее время, решением международной организации CODATA³, рекомендовано использовать следующее значение «гравитационной постоянной» [4]

$$\mathbf{G} = 6,67384(80) \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2). \quad (2)$$

Ситуацию с непостоянством «гравитационной постоянной» хорошо отражает сводная таблица 1 из [4] — неизменны только *два знака после запятой*.

TABLE XXIV Summary of values of G used to determine the 2010 recommended value

Item number	Value ¹ ($10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$)	Relative standard uncertainty u_r	Identification
G_1	6.672 48(43)	6.4×10^{-5}	NIST-82
G_2	6.672 9(5)	7.5×10^{-5}	TR&D-96
G_3	6.673 98(70)	1.0×10^{-4}	LANL-97
G_4	6.674 255(92)	1.4×10^{-5}	UWash-00
G_5	6.675 59(27)	4.0×10^{-5}	BIPM-01
G_6	6.674 22(98)	1.5×10^{-4}	UWup-02
G_7	6.673 87(27)	4.0×10^{-5}	MSL-03
G_8	6.672 28(87)	1.3×10^{-4}	HUST-05
G_9	6.674 25(12)	1.9×10^{-5}	UZur-06
G_{10}	6.673 49(18)	2.7×10^{-5}	HUST-09
G_{11}	6.672 34(14)	2.1×10^{-5}	JILA-10

¹Correlation coefficients: $r(G_1, G_3) = 0.351$; $r(G_8, G_{10}) = 0.234$.

Таб. 1. Значения «гравитационной постоянной», полученные некоторыми исследовательскими группами [4].

Весь опыт осознанного, инструментального наблюдения за орбитами планет, динамикой галактик [5], приливами на море и суше, гравиметрическими измерениями, статическими и динамическими опытами с крутильными весами, позволяет утверждать, что гравитационное взаимодействие материальных тел определяется только величиной взаимодействующих масс и расстоянием между ними. Иными словами, *гравитационное взаимодействие определяется только характером распределения всей совокупности материального вещества в физическом пространстве*.

³Committee on Data for Science and Technology (Комитет по данным для науки и техники) & The CODATA Task Group on Fundamental Constants (Рабочая группа CODATA по фундаментальным константам). <http://www.codata.org>

Процесс уточнения «гравитационной постоянной», со временем, превратился в серьёзную самостоятельную проблему. Более 200 летний путь совершенствования методик, повышения чувствительности измерительных приборов не привёл даже к, естественно ожидаемому, асимптотическому уточнению константы G . У всех исследовательских групп, неизменными остаются только два знака после запятой в системе СИ. В качестве примера современного подхода к косвенному измерению «гравитационной постоянной» может служить работа "*Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback*" [6].

Что означает, на практике, такое непостоянство в третьем и последующих знаках после запятой? В чём причина почти двух вековой эпопеи без результативного поиска точного значения «гравитационной постоянной» G посредством косвенных измерений? Рассмотрим сложившуюся ситуацию с точки зрения того, что мы хотим и того, что мы имеем, то есть решаем прямую задачу метрологии.

2. Расчётная модель крутильных весов

За основу мы взяли простейший вариант крутильных весов, которые позволяют фиксировать проявление гравитационного взаимодействия между массами, через статический угол закручивания кварцевой нити. Переходные процессы не рассматриваем. Анализ других конструктивных и методологических реализаций косвенных измерений «гравитационной постоянной» мы не затрагиваем, так как, а это будет видно в дальнейшем, они обременены теми же недостатками, что и классическая измерительная схема, основанная на измерении угла закручивания нити подвеса в крутильных весах.

На рис. 2 представлена расчётная схема крутильных весов, в декартовой системе координат $Oxyz$. Ось Oz перпендикулярна плоскости рисунка и направлена к нам. Невесомое и недеформируемое коромысло A_1A_2 , с двумя равными массами m_A по краям, подвешено в точке O посредством невесомой и нерастяжимой кварцевой нити длиной L и диаметром d . Плечи коромысла равны, $|OA_1| = |OA_2| = h$. Плоскость поворота коромысла A_1A_2 вокруг точки O , перпендикулярна вектору напряжённости гравитационного поля Земли \underline{E}_{Terra} .

Контролируемое гравитационное воздействие на массы крутильных весов реализуется через две неподвижные массы m_B , расположенные на окружности с радиусом h в точках B_1 и B_2 . Ориентация неподвижных масс m_B определяется углом β между осью Ox и линией соединяющей точки B_1 и B_2 . За положительное направление отсчёта принимает пово-

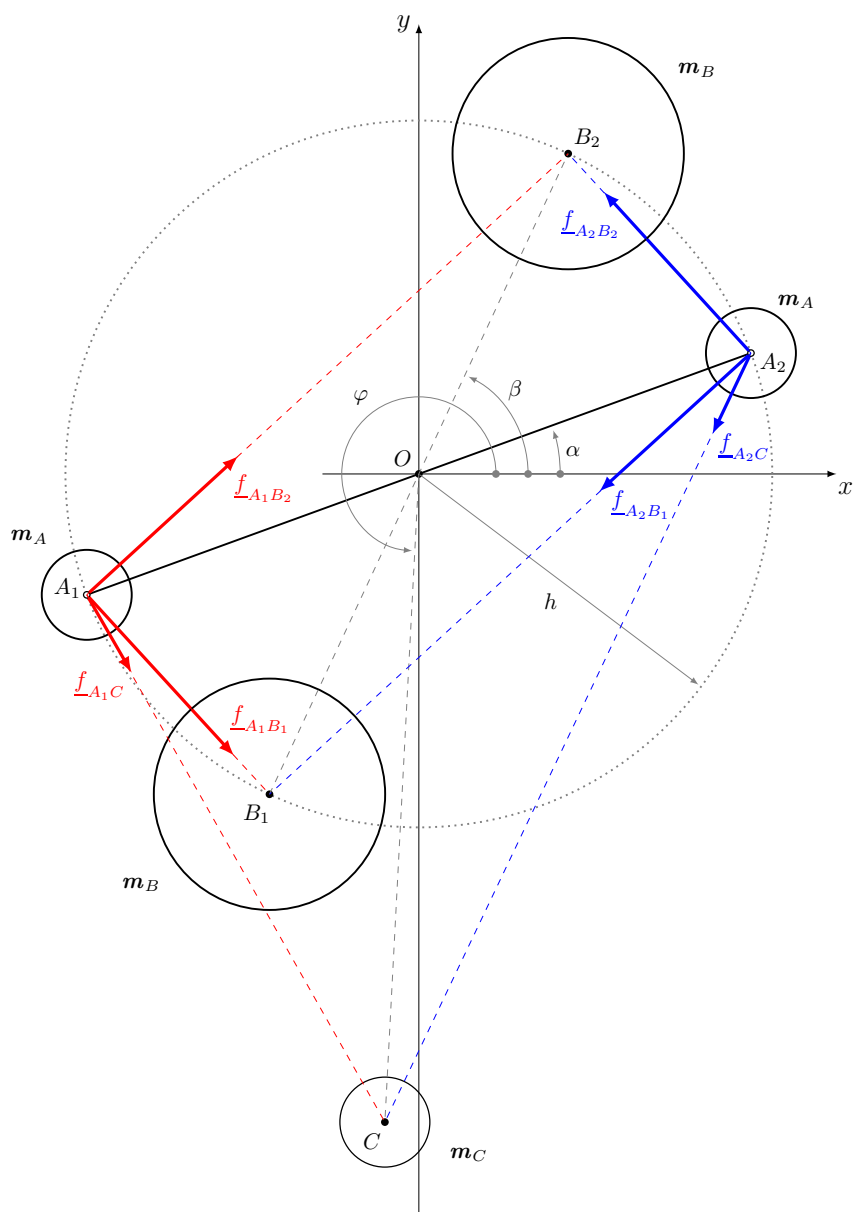


Рис. 2. Расчётная схема крутильных весов.

рот против часовой стрелки.

В дополнение ко всему мы учитываем влияние гравитационной аномалии m_C , которая расположена вне крутильных весов на расстоянии h_C от точки O с азимутом φ — угол между осью Ox и прямой OC . Для исключения смещения точки крепления кварцевой нити и коромысла относительно неподвижных масс m_B введём запрет на перемещение точки O

в плоскости Oxy . Это вызовет появление соответствующей реакции в точке O , но это не будет влиять на статическое равновесие системы.

Статическое равновесие коромысла A_1A_2 определяется углом α , поэтому положение подвижных масс m_A в точках A_1 и A_2 можно задать радиус-векторами:

$$\underline{r}_{A_1} = h \begin{pmatrix} \cos(\pi + \alpha) \\ \sin(\pi + \alpha) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \underline{r}_{A_2} = h \begin{pmatrix} \cos(\alpha) \\ \sin(\alpha) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Аналогично задаётся положение и неподвижных масс в точках B_1 и B_2

$$\underline{r}_{B_1} = h \begin{pmatrix} \cos(\pi + \beta) \\ \sin(\pi + \beta) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \underline{r}_{B_2} = h \begin{pmatrix} \cos(\beta) \\ \sin(\beta) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

а так же радиус-вектор гравитационной аномалии m_C

$$\underline{r}_C = h_C \begin{pmatrix} \cos(\varphi) \\ \sin(\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Система находится в равновесии, а это значит, что сумма всех моментов, действующих на кварцевую нить подвеса, равна нулю.

Реакция нити подвеса коромысла на закручивание проявляется через момент упругих сил \underline{M}_α и определяется следующим образом:

$$\underline{M}_\alpha = \left(0 \quad 0 \quad -\alpha \frac{Y_\tau J_p}{L} \right)^T, \quad \text{где} \quad J_p = \frac{\pi d^4}{32}. \quad (6)$$

Здесь, α — угол закручивания нити подвеса; Y_τ — модуль сдвига материала нити подвеса [7]; J_p — полярный момент инерции круглого сечения нити подвеса; L, d — длина и диаметр нити подвеса соответственно.

Моменты гравитационных сил, закручивающих нить подвеса, можно разделить на две составляющие: момент от гравитационного воздействия неподвижных масс \underline{M}_β и момента от гравитационной аномалии \underline{M}_φ .

В силу осевой симметрии расположения масс (рис. 2) рассмотрим гравитационное взаимодействие массы m_A с радиус-вектором \underline{r}_{A_1} и двух неподвижных масс m_B с радиус-векторами \underline{r}_{B_1} и \underline{r}_{B_2} , а затем удвоим момент.

$$\underline{M}_\beta(\alpha) = 2 \cdot \underline{r}_{A_1} \times (\underline{f}_{A_1 B_1} + \underline{f}_{A_1 B_2}), \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \underline{f}_{A_1 B_1} &= \underline{E}(m_B, \underline{r}_{B_1} - \underline{r}_{A_1}) m_A, \\ \underline{f}_{A_1 B_2} &= \underline{E}(m_B, \underline{r}_{B_2} - \underline{r}_{A_1}) m_A. \end{aligned} \quad (8)$$

Теперь добавим воздействие гравитационной аномалии m_C на массы расположенные по концам коромысла A_1A_2 :

$$\begin{aligned}\underline{f}_{A_1C} &= \underline{E}(m_C, \underline{r}_C - \underline{r}_{A_1}) m_A , \\ \underline{f}_{A_2C} &= \underline{E}(m_C, \underline{r}_C - \underline{r}_{A_2}) m_A .\end{aligned}\quad (9)$$

Силы \underline{f}_{A_1C} и \underline{f}_{A_2C} , в следствие геометрической асимметрии, вызовут дополнительный поворот коромысла и его перемещение в плоскости Oxy . В рамках поставленной нами задачи, представляет интерес только дополнительный вклад в статический угол закручивания нити подвеса гравитационной аномалии m_C , поэтому на смещение точки O (точка крепления коромысла с нитью подвеса) наложен запрет — $|\underline{r}_O| = 0$.

Таким образом, выражение для крутящего момента, создаваемого гравитационной аномалией m_C с радиус-вектором \underline{r}_C , примет вид

$$\underline{M}_\varphi(\alpha) = \underline{r}_{A_1} \times \underline{f}_{A_1C} + \underline{r}_{A_2} \times \underline{f}_{A_2C} . \quad (10)$$

Крутильные весы находятся в статическом равновесии, то есть сумма гравитационных моментов \underline{M}_β (7), \underline{M}_φ (10) и крутящего момента упругих сил \underline{M}_α (6) равна нулю:

$$\underline{M}_\alpha(\alpha) + \underline{M}_\beta(\alpha) + \underline{M}_\varphi(\alpha) = 0 . \quad (11)$$

Из этого трансцендентного уравнения мы определяем статический угол закручивания α , чем устанавливаем взаимосвязь между углом поворота коромысла α и параметрами крутильных весов. Для угла α существует ограничение сверху, определяемое геометрией расчётной схемы (рис. 2). Максимально возможный угол поворота коромысла A_1A_2 может быть определён, как

$$\alpha_{max} = \beta - \arccos \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R_A + R_B}{h} \right)^2 \right) , \quad (12)$$

где α_{max} — максимально возможный угол поворота коромысла; R_A, R_B — радиусы подвижного и неподвижного шаров соответственно.

Для дальнейшего исследования точности задаваемых параметров крутильных весов выразим из (11), «гравитационную постоянную» \mathbf{G}

$$\mathbf{G} = \alpha \frac{Y_\tau}{L} \frac{\pi d^4}{32} \frac{2h}{m_A m_B} \left(\frac{\cos \xi}{\sin^2 \xi} - \frac{\sin \xi}{\cos^2 \xi} \right)^{-1} , \quad \xi = \frac{\beta - \alpha}{2} . \quad (13)$$

Это уравнение позволяет определить необходимую точность, для каждого из определяющих параметров крутильных весов, обеспечивающую

достижение изначально затребованной точности значения «гравитационной постоянной». Так как нас интересуют точностные характеристики самих крутильных весов, с калиброванными массами m_A и m_B , то при выводе уравнения (13) был исключён фактор внешнего гравитационного воздействия аномалии m_C на массы m_A . Само влияние гравитационной аномалии на угол закручивания нити подвеса будет рассмотрено отдельно, после решения основной задачи.

3. Расчёт необходимой точности параметров системы

Задавшись точностью вычисления значения «гравитационной постоянной», определим необходимую точность измерения угла поворота коромысла и ключевых конструкционных и физико-механических параметров крутильных весов.

Под требованием точности, вычисляемого значения «гравитационной постоянной», мы будем понимать число значащих знаков после запятой в системе СИ. Тем самым, каждому десятичному разряду в значении «гравитационной постоянной» мы ставим в соответствие приращение $\Delta \mathbf{G}$:

$$\Delta \mathbf{G} = [0,1; 0,01; 0,001; 0,0001; \dots] \times 10^{-11} \text{ м}^3 / (\kappa_2 \cdot \text{с}^2) . \quad (14)$$

Изначально невесомое коромысло с массами m_A на концах, под действием гравитационных сил масс m_B , находится в статическом равновесии под углом α к оси Ox . Угол α определяем из уравнения (13) с учётом невозмущённой «гравитационной постоянной».

Задав приращение «гравитационной постоянной» $\Delta \mathbf{G}$, из последовательности (14), мы находим соответствующую поправку для выбранного параметра крутильных весов, которая полностью компенсирует последствия заданного возмущения \mathbf{G} , то есть сохраняет изначально статическое равновесие, характеризуемое углом α . Эта компенсационная поправка и будет той, максимально допустимой, абсолютной ошибкой с которой должен быть определён выбранный параметр системы.

В первую очередь оценим необходимую точность измерения угла закрутки α . Изменим «гравитационную постоянную» \mathbf{G} на величину $\Delta \mathbf{G}$ в уравнении (6) и найдём новый угол закручивания, отличный от первоначального. Разность этих углов обозначим через $\Delta \alpha$. Следовательно, если мы хотим получить значение «гравитационной постоянной» с заданной точностью $\Delta \mathbf{G}$, то мы должны обладать технической возможностью

измерять угол⁴ закручивания нити подвеса с абсолютной точностью $\Delta\alpha$.

Далее, сохраняя статическое равновесие, характеризуемое неизменным углом закручивания α в уравнении (13), установим взаимосвязь между заданным отклонением «гравитационной постоянной» ΔG и величиной соответствующих компенсационных поправок для базовых параметров крутильных весов, а именно: m_B , L , d и Y_τ . В таб. 2 приведены параметры крутильных весов, используемые в расчётной схеме (рис. 2).

Таб. 2. Основные параметры крутильных весов.

$L = 0,7 \text{ м}$	— длина нити подвеса коромысла;
$d = 50 \text{ мкм}$	— диаметр нити подвеса;
$h = 100 \text{ мм}$	— длина плеча коромысла;
$Y_\tau = 31,1966 \text{ ГПа}$	— модуль сдвига нити подвеса (материал: SiO_2);
$R_A = 10 \text{ мм}$	— радиус сфер (подвижных масс) на концах коромысла;
$m_A = 0,0821 \text{ кг}$	— масса подвижной сферы (материал: W);
$R_B = 70 \text{ мм}$	— радиус сфер (неподвижных масс);
$m_B = 28,1604 \text{ кг}$	— масса неподвижной сферы (материал: W);
$\beta = 57^\circ$	— угол, определяющий расположение неподвижных масс m_B ;

Результаты расчёта необходимой абсолютной точности измерения параметров крутильных весов приведены в таб. 3. Полученные результаты представлены на рис. 3–4, откуда хорошо виден значительный рост требований к точности измерения базовых параметров крутильных весов по мере роста числа значащих цифр после запятой в значении «гравитационной постоянной». Максимальная ошибка косвенного измерения «гравитационной постоянной» отображена графически на рис. 3–4 и бы-

⁴В случае если взаимодействующие материальные тела m_A и m_B , это однородные сферы, то угол закручивания нити подвеса коромысла является, по сути, строгим угловым эквивалентом расстояния между геометрическими центрами сфер и следовательно, имеются все основания использования (1) для вычисления «гравитационной постоянной».

В иных случаях, когда в качестве пары масс используют тела с геометрией отличной от сферы, например цилиндры, возникает проблема с использованием закона всемирного тяготения (1), так как сила гравитационного взаимодействия, уже не соотносится с расстоянием между центрами масс цилиндров. В этом случае применяют поправочные коэффициенты, которые являются результатом приближённого решения задачи о гравитационном взаимодействии материальных тел цилиндрической формы, а это, в свою очередь, привносит дополнительную неопределённость при вычислении значения «гравитационной постоянной».

Таб. 3. Максимально допустимая абсолютная точность измерения параметров крутильных весов для различных значений абсолютной точности «гравитационной постоянной».

$\Delta \mathbf{G} \times 10^{-11}$	$\Delta \alpha$, <i>угл.сек</i>	Δm_B , <i>гр</i>	ΔL , <i>мм</i>	Δd , <i>мкм</i>	ΔY_τ , <i>ГПа</i>
0,1	662,654	415,696	10,333	0,18624	0,46741
0,01	65,541	42,129	1,047	0,01872	0,04674
0,001	6,547	4,219	0,105	0,00187	0,00467
0,0001	0,655	0,422	0,010	0,00019	0,00047
0,00001	0,065	0,042	0,001	0,00002	0,00005

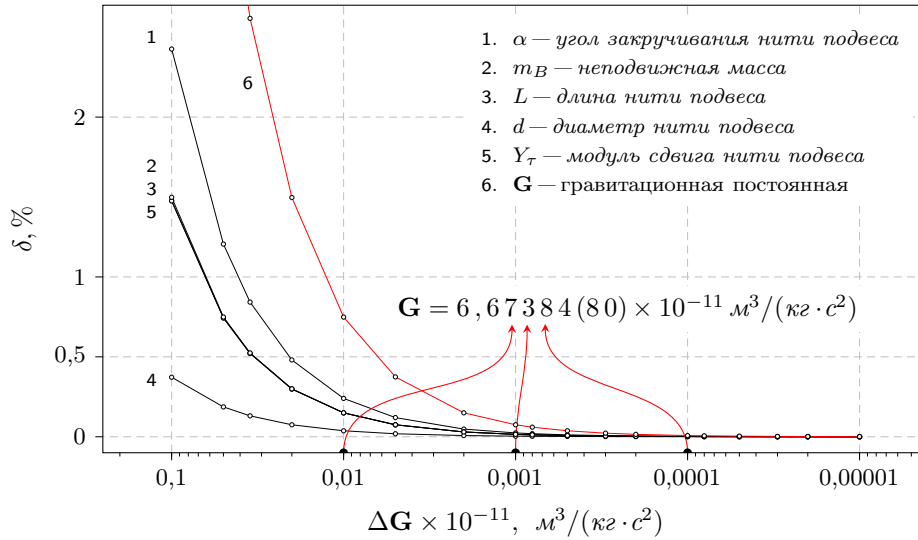


Рис. 3. Относительная точность параметров расчётной модели в зависимости от десятичного разряда в значении «гравитационной постоянной».

ла рассчитана по следующей формуле

$$\delta \mathbf{G} = \frac{1}{\mathbf{G}} \sum_{i=1}^5 \left| \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial q_i} \right| \Delta q_i, \quad \text{где } q_i = \{ \alpha, m_B, L, d, Y_\tau \}. \quad (15)$$

На основании таб. 3, рис. 3–4 и того, что ошибки суммируются (15), можно сформулировать следующее эмпирическое правило, а именно, при нахождении «гравитационной постоянной» с точностью, например $\Delta \mathbf{G} = 0,001 \times 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с}^2)$, необходимо при расчёте максимально допустимых абсолютных погрешностей измерения, по каждому из параметров крутильных весов, исходить из $\Delta \mathbf{G}$ на порядок меньшего.

Конечно, можно отказаться от использования параметров L , d , Y_τ ,

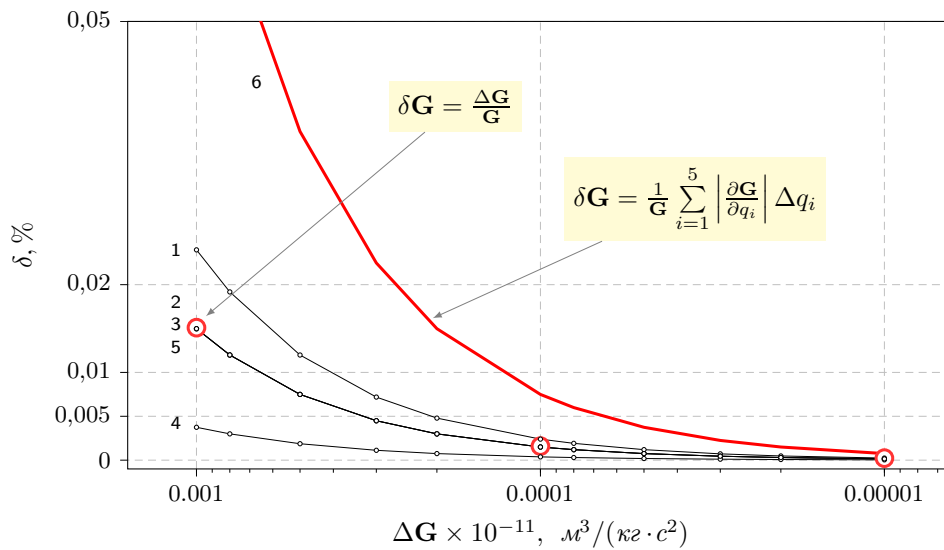


Рис. 4. Фрагмент рис. 3 в увеличенном масштабе.

заменяв их одним коэффициентом жёсткости на скручивание, проведя дополнительный эксперимент, исключив массы m_B , по месту и без нарушения целостности экспериментальной установки. В ходе этого эксперимента, по фиксируемому периоду крутильных колебаний коромысла, определяется фактическая жёсткость на кручение нити подвеса, но при этом, по-прежнему остаётся проблема с точностью измерения массы, угла закручивания, линейных размеров и времени (период крутильных колебаний).

Влияние гравитационной аномалии m_C на угол закручивания α . Теперь оценим эффект влияния гравитационной аномалии m_C на измеряемый, в ходе эксперимента, угол закручивания нити подвеса коромысла A_1A_2 крутильных весов (рис. 2). Примем, что до появления гравитационной аномалии m_C коромысло крутильных весов было повернуто на угол α . Воспользовавшись уравнением баланса моментов (11), вычислим новый статический угол закручивания α_C , который учитывает присутствие гравитационной аномалии m_C в точке C с радиус-вектором r_C . Асимметричное расположение массы m_C создаёт дополнительный крутящий момент и реакцию в точке O . Рассматриваем только момент, так как в рамках поставленной задачи, коромысло A_1A_2 может совершать только поворот в плоскости Oxy вокруг точки O .

В таб. 4 сведены результаты расчётов, показывающие влияние гравитационной аномалии на угол закручивания нити подвеса коромысла.

Таб. 4. Влияние гравитационной аномалии ($m_C = 100 \text{ кг}$, азимутальное направление $\varphi = 90^\circ$) на угол закручивания нити при различном её удалении от точки O .

$ r_C , \text{ м}$	$(\alpha_C - \alpha), \text{ угл.сек}$	$\delta\alpha, \%$
2	6,4526091	0,0236213
3	1,9179015	0,0070209
5	0,4149482	0,0015190
10	0,0519051	0,0001900
30	0,0019228	0,0000070
<i>Луна</i>	0,0008894	0,0000033
50	0,0004153	0,0000015

Анализ данных из таб. 4 однозначно показывает необходимость обеспечения, локальной осевой симметрии гравитационного поля в радиусе 3–5 метров от нити подвеса коромысла крутильных весов. Что касается небесных тел, то для нашей расчётной схемы, гравитационная аномалия, даже в виде Луны (в точке перигея), оказывает чрезвычайно малое, не измеряемое инструментально, влияние на угол закручивания нити подвеса крутильных весов. Поэтому небесные тела можно исключить из рассмотрения.

4. Выводы

Фактически, решение прямой задачи метрологии, на примере математической модели крутильных весов, даёт ответ на вопрос, почему, в течение стольких лет, нет прогресса в уточнении «гравитационной постоянной» и почему его трудно ожидать в обозримом будущем. Поразрядный анализ показал, что существующие на сегодня проблемы с точностью определения «гравитационной постоянной» имеют вполне реальную и ординарную причину — ограниченные метрологические возможности экспериментатора в сочетании с методологическими стереотипами.

Экспериментатор, для получения необходимой точности «гравитационной постоянной», должен, её увеличить на порядок и найти соответствующие этой точности, максимально допустимые ошибки измерения параметров системы, которые и обеспечат вычисление «гравитационной постоянной» с заданной изначально точностью, конечно если эти ошибки параметров соотносятся с реальными метрологическими возможностями лаборатории.

Ко всему выше сказанному, непременно требуется выполнить ещё од-

но условие, а именно, обеспечить гравитационное поле с осевой симметрией относительно нити подвеса коромысла крутильных весов. Гравитационное влияние небесных тел можно исключить ввиду его малости.

Итак, обобщая всё выше изложенное, можно утверждать, что на данный момент времени «гравитационная постоянная» вычислена с точностью до второго десятичного знака после запятой в системе СИ, а непостоянство последующих знаков (таб. 1, стр. 3), то это следствие особенностей конкретных экспериментальных установок, метрологических возможностей лабораторий, методик эксперимента, внешних факторов etc. Поэтому, процесс уточнение «гравитационной постоянной» превращается в бессмысленную трату времени и ресурсов, хотя сам процесс поиска *experimentum crucis*, для косвенного измерения «гравитационной постоянной», с метрологической и инженерной точки зрения, представляется важным и полезным.

Список литературы

- [1] Томилин, К. А. Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах / К. А. Томилин. — ФИЗМАТЛИТ, 2006.
- [2] Kiryan, D. G. On the Gravitational Mass / D. G. Kiryan, G. V. Kiryan // *International Journal Of Applied And Fundamental Research*. — 2013. — Vol. 1. — <http://www.science-sd.com/452-24059>.
- [3] Kiryan, D. G. Gravitational interaction in the medium of non-zero density / D. G. Kiryan, G. V. Kiryan // *e-prints viXra:1406.0128v2*. — 2014. — Jul. — P. 24. — <http://vixra.org/abs/1406.0128>.
- [4] Mohr, P. J. CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2010 / P. J. Mohr, B. N. Taylor, D. B. Newell // *Reviews of Modern Physics*. — 2012. — Nov. — Vol. 84, no. 4. — Pp. 1527–1605.
- [5] Kiryan, D. G. The Evolution of the System of Gravitating Bodies / D. G. Kiryan, G. V. Kiryan // *e-prints viXra:1607.0390v4*. — 2016. — P. 19. — <http://vixra.org/abs/1607.0390>.
- [6] Gundlach, J. H. Measurement of Newton's Constant Using a Torsion Balance with Angular Acceleration Feedback / J. H. Gundlach, S. M. Merkowitz. — 2000. — 11. — Vol. 85. — Pp. 2869–72.
- [7] Стронг, Д. Техника физического эксперимента / Д. Стронг. — Ленинградское газетно-журнальное и книжное издательство, 1948.