

УДК 006.91

Э. А. КАМАЛИЕВ

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. Э. В. САФИН

Уфимский государственный авиационный технический университет

ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭТАЛОНА МАССЫ, ПОСТОЯННОЙ АВОГАДРО И ПОСТОЯННОЙ ПЛАНКА

Аннотация. В работе описываются два метода по переопределению эталона массы, а так же выявляются проблемы предыдущих и преимущества новых эталонов.

Ключевые слова: первичный эталон, эталон массы, килограмм, физические константы, постоянная Планка, постоянная Авогадро, весы Киббла, кремниевая сфера.

На сегодняшний день килограмм последняя, основная единица системы СИ, определенная физическим объектом, а именно цилиндром, с диаметром и высотой 39,17 мм из платиноиридиевого сплава. Его называют Международным прототип килограмма или же просто – эталоном массы. Все остальные единицы системы измерений уже давно привязаны к константам, что дает неизменность и постоянность значений единицы.

Ученые всего мира занимаются большой работой по привязке килограмма к определенной физической константе. Было предложено очень много методов и подходов по переопределению, но в конце концов, ученые пришли к выводу, что можно выразить килограмм через физическую константу, используя два основных метода:

1. Метод «кремниевой сферы». Если кратко, суть метода заключается в подсчете количества атомов в идеальной кремниевой сфере, и в дальнейшем точным определением постоянной Авогадро.

2. Метод WATT баланса. Здесь работают весы Киббла. Их принцип схож с обычными весами, но тут работают физические законы, такие как Джозефсоновский переход и квантовый эффект Холла.

Нынешний эталон массы хранится под тремя куполами, рядом со своими шестью братьями килограммами, в кондиционируемом хранилище, закрытыми тремя независимыми ключами, в подвале Международного бюро мер и весов,

недалеко от Парижа. Наряду с первым эталоном, создали десятки дубликатов. Дубликаты были разосланы в разные страны по всему миру в качестве государственных эталонов. В 1948 году дубликаты были собраны для взвешивания тут и начались проблемы.

Все цилиндры были из одного сплава, и они хранились в одинаковых условиях, но их масса постепенно начала изменяться. Масса эталона отличалась от тех шести эталонов, которые хранились вместе с ним. Более проблематичной оказалось то, что они еще раз были собраны вместе через 40 лет, и их разница в массе так же продолжала расти, которая составляла к тому времени около 50 микрограмм.

Эффекты диффузии и испарения изменили массу цилиндров. Невозможно опираться на меру, которая меняет свое значение.

Это недопустимо в нынешней современной метрологии, и безусловно, ученые озадачены этим вопросом. Поэтому на помощь приходят гениальные методы переопределения килограмма.

Использовалось несколько стратегий, но двумя самыми успешными оказались: метод кремниевой сферы и использование БАТТ баланса.

Методом переопределения килограмма кремниевой сферой, занимаются ученые из Государственного объединения научных и прикладных исследований(CSIRO). Суть этого метода заключается в подсчете количества атомов в сфере из изотопа кремния 28. Подсчет атомов проводится с помощью вычислений. Как известно, в изотопе кремния 28, нет смещений и пустот. Это значит, что их атомы расположены максимально близко друг к другу. К тому же, сфера должна быть идеально круглой.

Зная диаметр сферы, можно вычислить весь его объем. Так же, если знать точное расстояние между атомами кремния, то можно рассчитать, из скольких атомов состоит эта сфера. Ниже приведены формулы, по которым можно рассчитать объем сферы¹ и количества его атомов²:

$$V = \frac{\pi * d^3}{6} \quad (1)$$

$$N = \frac{V}{s} \quad (2)$$

где d - диаметр сферы, s - расстояние между атомами.

Вычисление постоянной Авогадро связано с химическими свойствами, но следующий метод основан на физических законах.

Методом БАТТ баланса занимаются ученые из Национального института стандартов и технологий (NIST).

Обычные весы работают, уравнивая силу тяжести действующее на объекты на чашах. Весы Киббла выглядят похоже, но все взвешивания происходит слева, где чаша с измеряемой массой прикреплена к катушке в магнитном поле, а справа находится двигатель. Установка весов герметична, она работает в вакууме. БАТТ баланс работает в двух режимах: взвешивания и скорости. В режиме взвешивания эталон килограмма помещается на чашу, а затем пропускают электрический ток через катушку в магнитном поле, подстраивая его, пока вес эталона не будет равен и противоположно направлен электромагнитной силы в катушке. Уравнения этого взвешивания:

$$mg = BLI \quad (3)$$

где m – масса, g – ускорение свободного падения, B – магнитная индукция, L – длина проволоки в катушке, I – ток протекающий в катушке.

В этом уравнении (3) сложно измерить с высокой точностью силу магнитного поля и длину проволоки в катушке. Но это можно решить, используя режим скорости. В этом режиме ток в проводнике отключается, проводник протягивается через то же магнитное поле с постоянной и точно замеренной скоростью v . При этом, по закону Фарадея, на концах проводника образуется напряжение:

$$U = BLv \quad (4)$$

где U – магнитная индукция, L – длина проволоки в катушке, v – скорость.

Есть два уравнения (3) и (4), которые можно решить относительно произведения $-BL$. Их можно приравнять и сократить.

После преобразований получаем уравнение (5):

$$\frac{U}{v} = \frac{mg}{I}$$

Затем, перемножив части уравнения (5) получим:

$$UI = mgv \quad (6)$$

Из уравнения (6) мы видим, что слева – это электрическая мощность, а справа механическая мощность. Вот почему устройство называли ВАТТ балансом. Но как перейти от этого к постоянной Планка?

Для этого есть способы точного измерения напряжения, с использованием макроскопического квантового эффекта на основе джозефсоновского перехода. Это явление протекания сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника. Микроволновое излучение приложенное к этому переходу создает напряжение во всём устройстве, значение которого точно известно и равно:

$$U = n \frac{hf}{2e} \quad (7)$$

где h – постоянная планка, f – частота излучения, e – заряд электрона, n – количество джозефсоновских переходов.

Подстраивая частоту f и соединяя последовательно нужное число джозефсоновский переходов n , можно создать практически любое нужное напряжение U . В весах Киббла используется сотни тысяч джозефсоновских переходов, которые входят в цепь с катушкой, проходящих через магнитное поле. В итоге можно точно уравновесить напряжение возникающее в катушке. Используя джозефсоновский переход можно измерить это напряжение с очень высокой точностью. Но как измерить ток? Оказывается этот метод измерения напряжения настолько хорош, что вместо измерения тока напрямую, измеряется отношение напряжения к сопротивлению, что то же самое. Ток

протекает через резистор, и измеряется напряжение, снова используя джозефсоновские переходы. Затем, чтобы измерить сопротивление используем другой макроскопический квантовый эффект – квантовый эффект Холла. Это очень сложный эффект, и достаточно сказать, что измеренное сопротивление будет равно:

$$R = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{h}{e^2} \quad (8)$$

Если мы подставим уравнения (7) и (8) в уравнение (6) и решим его относительно $\hbar$ то получим, что постоянная планка равна:

$$h = \frac{4}{\pi n^2} \cdot \frac{gv}{f^2} \cdot m \quad (9)$$

И вот очень точное уравнение (9) для постоянной Планка, выраженное через массу в 1 кг [1].

Благодаря этим методам, каждая страна сможет самостоятельно воспроизводить эталон массы в любое время, без необходимости сверки с какими-либо «главными эталонами», зная только значения химических и физических констант.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Понятов. Последним сдался килограмм // Наука и жизнь. – 2019. – № 3. – С. 2–7.
2. Yang, Lu; Mester, Zoltán. Determination of the atomic weight of ^{28}Si -enriched silicon for a revised estimate of the Avogadro constant // Analytical chemistry. – 2012. – № 84(5) – С. 2321–2327.