УДК 006.915.1SI + 531.751

ДО НОВОЇ МІЖНАРОДНОЇ СИСТЕМИ ОДИНИЦЬ: ПЕРСПЕКТИВИ ПЕРЕВИЗНАЧЕННЯ І ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ОДИНИЦІ МАСИ – КІЛОГРАМА

П.І. Неєжмаков, *кандидат технічних наук, перший заступник генерального директора з наукової роботи ННЦ "Інститут метрології", м. Харків*

Розглянуто стан перевизначення основних одиниць Міжнародної системи SI та проаналізовано результати експериментів у проектах ват-ваг і Авогадро.

The condition of revision of the basic units of International System of Units (SI) is considered and the results of experiments in Vat-Balance Project and the Avogadro Project are analyzed.

Вступ

Міжнародна система одиниць (SI) є всесвітньою системою вимірювань, яка використовується в науці, торгівлі й комерції. Походження SI пов'язане з підписанням у 1875 р. уповноваженими представниками 17-ти держав Дипломатичного договору – Метричної конвенції (*Convention du Mètre*) [1] для забезпечення "міжнародної уніфікації та вдосконалення Метричної системи". Згідно з договором було утворено Міжнародне бюро мір та ваг (BIPM) для зберігання та проведення звірень "прототипів метра і кілограма" та засновано Міжнародний комітет мір та ваг (CIPM) для здійснення керівництва діяльністю BIPM. Було встановлено термін скликання Генеральних конференцій з мір та ваг (CGPM) для обговорення та пропонування заходів, які "необхідні для розповсюдження та вдосконалення Метричної системи".

При введенні Метричної системи було не тільки встановлено основні одиниці, але й прийнято такі положення, згідно з якими похідні одиниці знаходяться у простому зв'язку з основними.

Вимоги до Метричної системи було сформульовано таким чином:

- система повинна базуватися на незмінному прототипі, взятому з природи;
- система повинна бути десятковою, щоб її впровадження спростило обчислювання.

Вибрані і прийняті CIPM міжнародні прототипи (еталони) метра і кілограма, що зберігалися в BIPM, на 1-й CGPM (1889 р.) було затверджено в якості одиниць довжини і маси. Таким чином, засновники Метричної конвенції в рамках існуючих у той час технологій і наукових знань віддали перевагу прототипам-артефактам (тобто матеріальним предметам, створеним людиною) і не змогли реалізувати принципи Д.К. Максвелла, який ще в 1870 р. зробив таке зауваження [2] з приводу визначень секунди, метра і кілограма, що спираються на розміри Землі і період її обертання: "інваріанти природи не є справжніми інваріантами, оскільки параметри нашої планети можуть змінитися і вона при цьому не перестане бути нашою планетою, але, якщо характеристики атома зміняться, він стане вже іншим атомом".

Історія питання

Вже на 3-й CGPM (1901 р.) було зроблено уточнення, що кілограм є одиницею маси, яка дорівнює масі міжнародного прототипу кілограма (IPK).

Величезний недолік цього визначення кілограма, яке збереглося і до нашого часу, в тому, що він визначається через масу артефакту, який внаслідок свого природного походження, як ми знаємо, не може бути абсолютно стабільним і його властивості з часом тією чи іншою мірою змінюються. Крім того, артефакти-еталони не можуть бути доступні повсюдно в будь-який час і будь-якій людині, а застосовуються лише для звірення в тій лабораторії, де вони зберігаються.

Результати звірень [3] між офіційними копіями та IPK з часом показують деяку розбіжність (рис. 1). З рисунка видно, що зміни становлять 50 мкг відносно до IPK еталона маси з часу першої повірки, яка відбулася понад 100 років тому. Дрейф маси самого IPK з 1889 р. не може бути контрольовано, проте він існує і може бути визначений тільки за допомогою абсолютних експерементів, які до теперішнього часу неможливі через необхідність забезпечення високої точності вимірювань. Величезний недолік існуючого визначення кілограма також у тому, що невідома величина дрейфу IPK також впливає на електричні одиниці, тому що за сучасним визначенням ампер також пов'язаний з кілограмом. Таким же чином визначення моля і кандели залежать від кілограма.

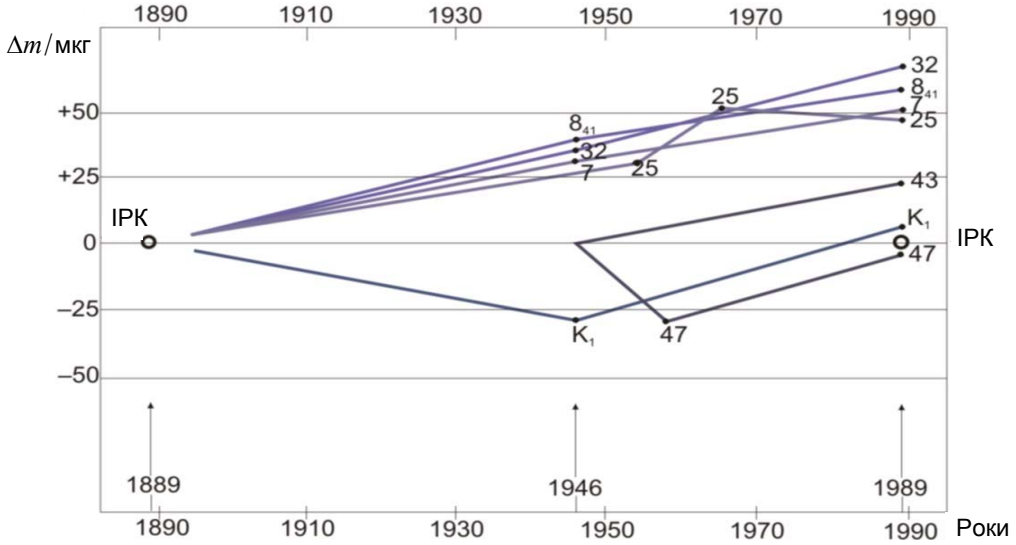

Рис. 1. Зміни в масі Δm шести офіційних копій відносно міжнародного прототипу ІРК

Структура нової SI

На 21-й CGPM (1999 р.) було рекомендовано (Резолюція 7) продовжити зусилля з поліпшення експериментів, пов'язаних із визначенням маси через фундаментальні константи, маючи за мету майбутнє перевизначення кілограма, що базується на квантових ефектах. Подальше перевизначення для забезпечення безперервності значення маси має бути узгоджене до декількох одиниць на 10^{-8} із сьогоднішнім визначенням.

Коли визначення кілограма буде ґрунтуватися на "інваріантах природи" замість матеріального артефакту, стане можливою практична реалізація (*mise en pratique*) одиниці маси SI в будь-якому місці і в будь-який час.

Резолюція 1, схвалена 24-ю CGPM (2011 р.), також звертає увагу на такі переваги перевизначення.

Міжнародна система одиниць буде системою одиниць, в якій:

частота надтонкого розщеплювання атома цезію-133 в основному стані $\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$ становить точно 9192631770 Гц;

швидкість світла у вакуумі c становить точно 299792458 м/с;

постійна Планка h становить точно $6{,}62606X\times\times10^{-34}$ Дж·с;

елементарний заряд e становить точно $1{,}60217X\times\times10^{-19}$ Кл;

постійна Больцмана k становить точно $1{,}3806\ X\times\times10^{-23}$ Дж/К;

постійна Авогадро N_A становить точно $6{,}02214X\times\times10^{23}$ моль$^{-1}$;

світлова ефективність K_{cd} монохроматичного випромінювання з частотою $540\cdot10^{12}$ Гц становить точно 683 лм/Вт,

де символ X є однією або декількома додатковими цифрами, які потрібно додати до числових значень h, e, k і N_A, з використанням значень, що базуються на найостаннішому коригуванні CODATA.

Резолюція 1 також ураховує мету CIPM виразити всі сім основних одиниць SI однаковим способом, використовуючи формули з точними константами ("*explicit-constant*"). На сьогодні визначення двох основних одиниць – секунди і метра – вже реалізовано через фундаментальні константи – надтонке розщеплювання ^{133}Cs та швидкість світла у вакуумі c (див. таблицю). Зафіксувавши значення сталих Джозефсона та Клітцинга, K_J і R_K відповідно, ампер можна буде простежити до них завдяки закону Ома. Для того щоб досягти прямої простежуваності до елементарного заряду, були проведені численні експерименти з використанням макроскопічних квантових ефектів, зокрема, ефекту одноелектронного тунелювання. Для того щоб замінити прототип кілограма і знайти атомну основу для моля, було застосовано різноманітні підходи фіксації сталих Авогадро і Планка, одиниць атомної маси або квантового магнітного потоку. Кандела пов'язана з енергетичними вимірюваннями, а отже, базується на електричних або механічних вимірюваннях.

Незважаючи на значні досягнення, отримані за останній час, Консультативний комітет з одиниць (CCU) на 20-му засіданні (2010 р.) визнав, що залишилися невеличкі, але значущі розбіжності між значеннями сталої Планка, яку було одержано з експериментів ват-ваг, і тими, які очікуються в проекті Авогадро з ізотопом сіліцію ^{28}Si. Тому впровадження перевизначення одиниць є передчасним. CCU вирішив не давати рекомендації стосовно дати, коли відбудеться перевизначення, або умов їх прийняття.

Резолюція 1 пропонує CIPM підготувати пропозиції CGPM для перегляду SI, "як тільки рекомендації Резолюції 12, прийняті на 23-й CGPM, будуть виконані". Дотримуючись цих рекомендацій, за останні кілька років Консультативні комітети, з метою обговорення наслідків можливого перегляду SI в майбутньому, створили спеціальні робочі групи, серед яких:

Основні одиниці SI та їх відношення до фундаментальних констант

Основні одиниці SI		Дата визначення	Рекомендовані константи, які використовуються для визначення одиниць		
			в існуючій SI	у новій SI	
Кілограм	кг	1889 р.	m (IPK)	h	Стала Планка
Ампер	А	1948 р.	μ_0	e	Елементарний заряд
Секунда	с	1967 р.	$\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$	$\Delta\nu(^{133}\mathrm{Cs})_{\mathrm{hfs}}$	Надтонке розщеплення Cs
Кельвін	К	1967 р.	T_{TPW}	k	Стала Больцмана
Моль	моль	1971 р.	$M(^{12}\mathrm{C})$	N_{A}	Стала Авогадро
Кандела	кд	1979 р.	K_{cd}	K_{cd}	Сила світла джерела випромінювання частотою 540 ТГц
Метр	м	1983 р.	c	c	Швидкість світла у вакуумі

• Робоча група CCM щодо еталонів маси – Цільова група 1 “Метрологія маси у вакуумі для *mise en pratique*”;

• Робоча група CCM щодо еталонів маси – Цільова група 2 “Компоненти невизначеності, обумовлені простежуваністю до міжнародного прототипу кілограма”;

• Робоча група CCM щодо постійної Авогадро (WGAV);

Ці робочі групи підготували Рекомендацію G1 CCM (2010 р.) “Принципи щодо нового визначення кілограма”, згідно з якою для перевизначення одиниці маси необхідне виконання таких умов:

• як мінімум, у трьох незалежних експериментах (ват-ваги, Авогадро) буде досягнута відносна стандартна невизначеність $u \le 5\cdot10^{-8}$ для h та N_{A} (і як мінімум, в одному $u \le 2\cdot10^{-8}$) з довірчим інтервалом 95 %;

• результати, які будуть отримані для h та N_{A}, повинні бути несуперечними на рівні 95 % довірчого інтервалу;

• кінцеве значення відносної стандартної невизначеності реалізації кілограма буде становити $u \le 2\cdot10^{-8}$;

• повинна бути підтверджена простежуваність прототипів BIPM та всіх еталонів, які беруть участь в експериментах ват-ваг та Авогадро до IPK (рис. 2);

• буде закінчено підготовку *mise en pratique*[*].

CCM також рекомендує, щоб “набір еталонів маси” було встановлено у BIPM для сприяння поширенню перевизначеного кілограма.

Сучасний стан з виконання Рекомендації G1

Отримано два результати з невизначеністю $u \le 5\cdot10^{-8}$ (NIST 2007, Avogadro 2011), однак розбіжність між значеннями отриманих результатів становить $17\cdot10^{-8}$. Таким чином, незважаючи на досягнутий за останні кілька років значний успіх, умови для прийняття рішення про перевизначення, встановлені 23-ю CGPM (2007 р.), ще повністю не виконано. Найбільш вирішальним фактом є те, що існує тільки два експерименти на сьогодні, які досягли відносної похибки менше ніж $5\cdot10^{-8}$ ($3{,}6\cdot10^{-8}$ для експерименту ват-ваг, виконаному в Національному інституті стандартів та технологій (NIST), США, [5] і $3\cdot10^{-8}$ для експерименту Авогадро, виконаному Міжнародним Співробітництвом Авогадро (IAC), координатором в якому був Федеральний

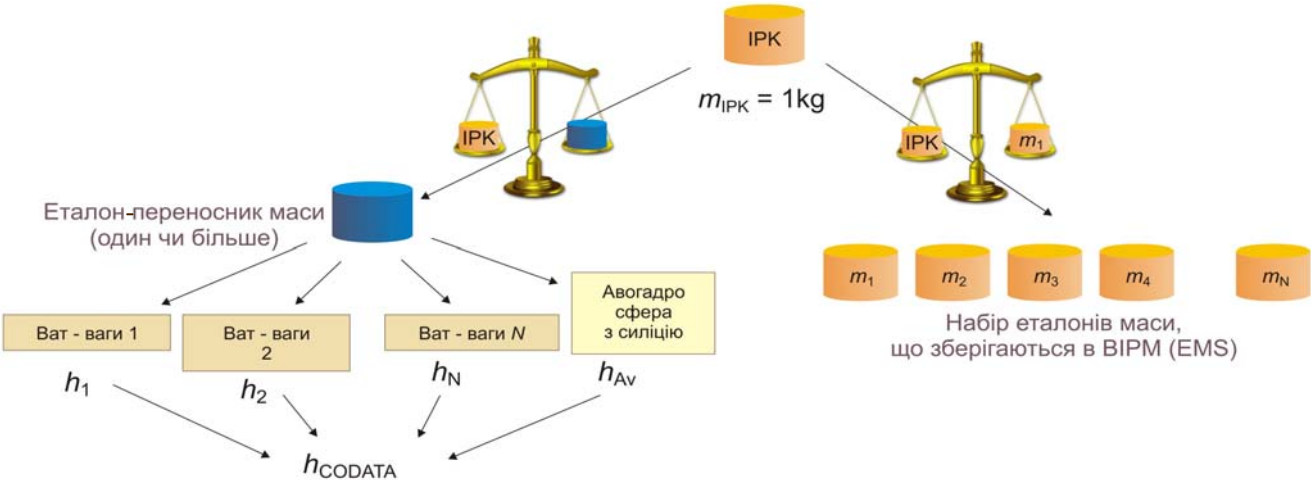

Рис. 2. Ланцюг простежуваності еталонів маси

[*] *Mise en pratique* для визначення одиниць – це набір інструкцій, які дозволяють визначити реалізацію одиниці на практиці з найвищим рівнем. *Mise en pratique* повинна описувати первинну реалізацію, що базується на первинних методах найвищого рівня. *Mises en pratique* для існуючих визначень містяться в Додатку 2 брошури SI [4].

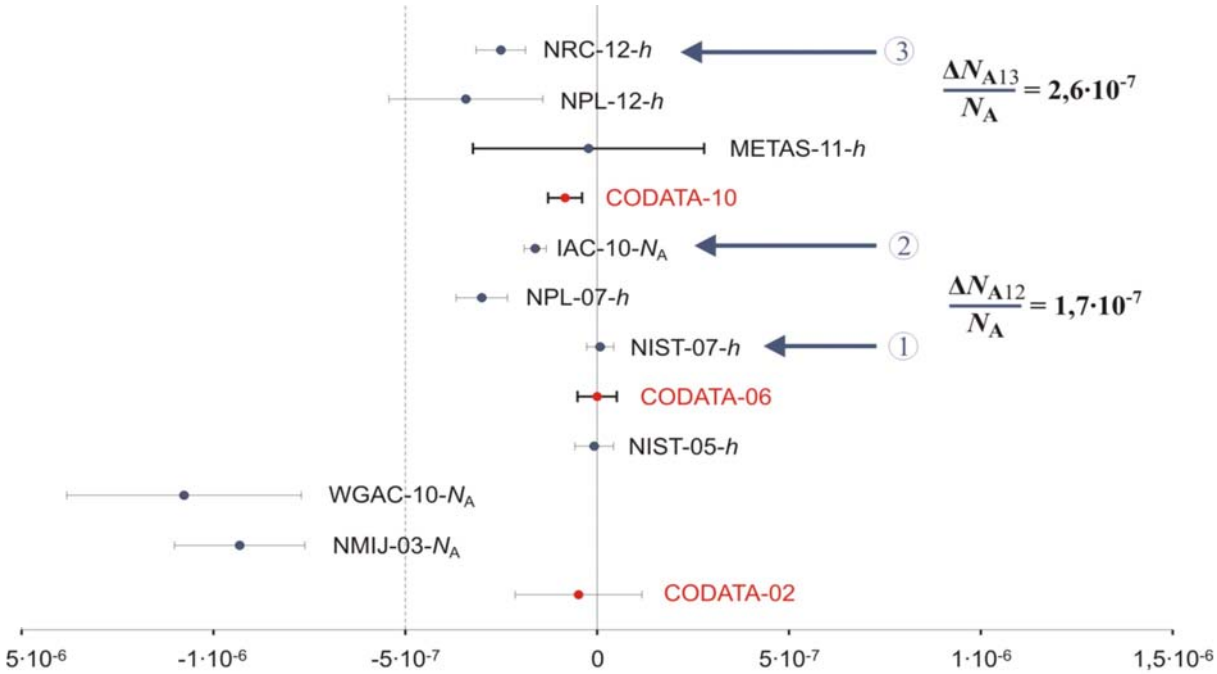

Рис. 3. Результати вимірювань сталої Авогадро N_A та сталої Планка

фізико-технічний інститут (PTB) Німеччини і в якому брали участь фахівці з національних метрологічних інститутів багатьох країн [6]). Але результати цих експериментів не узгоджуються (рис. 3). Різниця між отриманими результатми значна і досягає приблизно $1{,}7\cdot10^{-7}$. Різниця між нещодавно опублікованими результатами експериментів ватваг, отриманими в Національному метрологічному інституті (NRC) Канади ($6{,}5\cdot10^{-8}$) [7] і NIST [5], навіть більше і досягає приблизно $2{,}6\cdot10^{-7}$ (рис. 3).

Результати вимірювань сталої Авогадро N_A зі стандартною невизначеністю (для коефіцієнта охоплення $k=1$) наведені як відносні відхилення від значення CODATA, прийнятого в 2006 р. ($N_A=6{,}02214179(30)\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$). Результати для сталої Планка h (ват-ваги) були трансформовані за допомогою сталих CODATA, прийнятих в 2006 р. На рис. 5 наведено результати, отримані, починаючи з 2003 р. (NMIJ – Японія), 2005 та 2007 рр. (NIST – США), 2007 та 2011 рр. (NPL – Об'єднане королівство Великої Британії), 2010 р. (IAC), 2011 р. (METAS – Швейцарія), 2012 р. (NRC – Канада).

Основні причини необхідності перевизначення кілограма

Відповідно до сучасного визначення, одиниця маси кілограм – це маса міжнародного прототипу кілограма IPK. Це означає, що маса міжнародного прототипу кілограма завжди точно дорівнює 1 кілограму, m(IPK)=1 кг.

IPK зберігається під трьома скляними ковпаками у BIPM і являє собою циліндр діаметром і висотою 39 мм, виконаний зі сплаву платини та іридію, масова частка яких становить 90 та 10 % відповідно. Внаслідок неминучого накопичення забруднюючих частинок (приблизно 1 мкг на рік) поверхня IPK повинна очищатися від забруднення. З цією метою CIPM прийняв рішення, що до тих пір, поки не будуть проведені його дослідження, еталонна маса IPK – це маса після очищення і миття спеціальними методами. Еталон маси визначений таким чином використовується для калібрувань національних еталонів маси з платино-іридієвого сплаву [3].

Відповідно до нового визначення, кілограм – це одиниця маси, величину якої встановлено через значення сталої Планка, яка точно дорівнює $6{,}62606X\cdot10^{-34}$ і виражена в одиницях 1·м^2·кг і яка дорівнює Дж·с.

Таким чином, ми маємо точну рівність $h=6{,}62606X\cdot10^{-34}$ Дж·с. Значення сталої Планка може бути виражене як добуток джоуля на секунду, де Дж·с=с$^{-1}$·м^2·кг. Це визначення разом із таким же визначенням для секунди і метра дозволяє визначити одиницю маси в одиницях частоти за допомогою фундаментальних рівнянь фізики $E=m\cdot c^2$ і $E=h\cdot\nu$, які встановлюють співвідношення між енергією E, масою m та частотою ν і які приводять до виразу

$$m=\frac{h}{c^2}\cdot\nu.$$

Порівнюючи перевизначення кілограма з перевизначенням інших основних одиниць, ми повинні визнати, що воно є самим суттєвим з таких причин:

точне зважування і визначення маси є надзвичайно важливими для науки, техніки, торгівлі і промисловості;

вимоги щодо точності визначення маси дуже високі. Акредитовані лабораторії мас з гирями класу E_1, наприклад, зберігають вихідні еталони з відносною похибкою $2{,}5\cdot10^{-8}$ та $5\cdot10^{-8}$;

якби значення сталої Планка було встановлено зараз, то був би ризик стрибків приблизно на 10^{-7} в масових значеннях точних еталонів маси з відповідними наслідками для повірки обох класів ваг E_1 і E_2, які застосовуються у законодавчо-регульованій сфері відповідно до міжнародної рекомендації OIML 111 [8].

Експерименти з підготовки до перевизначення кілограма. Визначення за допомогою ват-ваг

Установка ват-ваги – це прилад для зважування, який після перевизначення кілограма може використовуватися в якості еталонного для визначення маси зразка. Вимірювання ват-вагами (рис. 4) складається з двох режимів – зважування і руху. Режим зважування подібний тому, який відбувається на аналітичних вагах. З рис. 4 видно, що силу тяжіння mg врівноважено електромагнітною силою. Остання спричинена електричним струмом I, який тече по всій довжині L дроту, що знаходиться в магнітному полі B. Таким чином, за умов рівноваги можна визначити масу як

$$m = \frac{BL}{g} \cdot I.$$

В аналітичних вагах BL/g визначається відношенням m/I. У ват-вагах вимірюється прискорення вільного падіння g, і BL усувається при виконанні режиму руху. Як видно з рис. 4, BL – відношення електричної напруги U до швидкості v:

$$BL = \frac{U}{v},$$

де $$m = \frac{U}{vg} \cdot I, \qquad (1)$$

або $$mvg = UI. \qquad (2)$$

Ліва частина рівняння (2) – механічна енергія, а права частина рівняння – електрична енергія. Обидві енергії вимірюються у ватах, звідси і назва установки – ват-ваги. Але (2) ще не містить фундаментальної сталої.

Багато НМІ зараз калібрують еталони електричної напруги та опору, використовуючи не визначення цих одиниць в SI, а квантові ефекти. Еталони напруги базуються на ефекті Джозефсона, а еталони опору базуються на квантовому ефекті Хола. Виходячи з цього, зробимо заміну виразу (1) на вираз

$$m = h\frac{f_1 f_2}{vg} C_{el}, \qquad (3)$$

де h – стала Планка; f_1 і f_2 – дві виміряних частоти; C_{el} – безрозмірний коефіцієнт.

У правій частині рівняння (3) з'являється зв'язок кілограма зі сталою Планка h.

Тоді відношення h до m(IPK) приймає вигляд

$$\frac{h}{m(IPK)} = \frac{vg}{f_1 f_2 C_{el}} \cdot m/\text{кг}.$$

Визначення через сталу Авогадро

Використання числа Авогадро є найбільш природним методом відтворення кілограма. Розглянемо експеримент із визначення сталої Авогадро через масу атома силіцію-28, $m(^{28}\text{Si})$, у кілограмах. Завдання полягало в порівнянні двох мас: $m(X)=a$ – маси сфери зі стабільного ізотопу ^{28}Si та маси IPK (рис. 5). Базуючись на простежуваності до IPK, можна записати:

$$\frac{m(X)}{m(\text{IPK})} = a/\text{кг},$$

де a/кг дорівнює близько $5 \cdot 10^{-26}$ при здійсненні цього звірення з відносною невизначеністю, яка набагато менша, ніж, наприклад, для еталонних гир 1 кг класу E_1.

Цей експеримент вимагав світового співробітництва, до якого було залучено багато національних метрологічних інститутів та інших лабораторій. Процедура полягала у створенні близького до ідеального кристала з масою, близькою до 1 кг, який складається повністю з атомів силіцію-28. Досконалість кристала дозволила в ході експерименту з використанням інноваційних методів визначити в кристалі кількість атомів n і таким чином визначити масу кристала $n \cdot m(^{28}\text{Si})$. Кристал було виго-

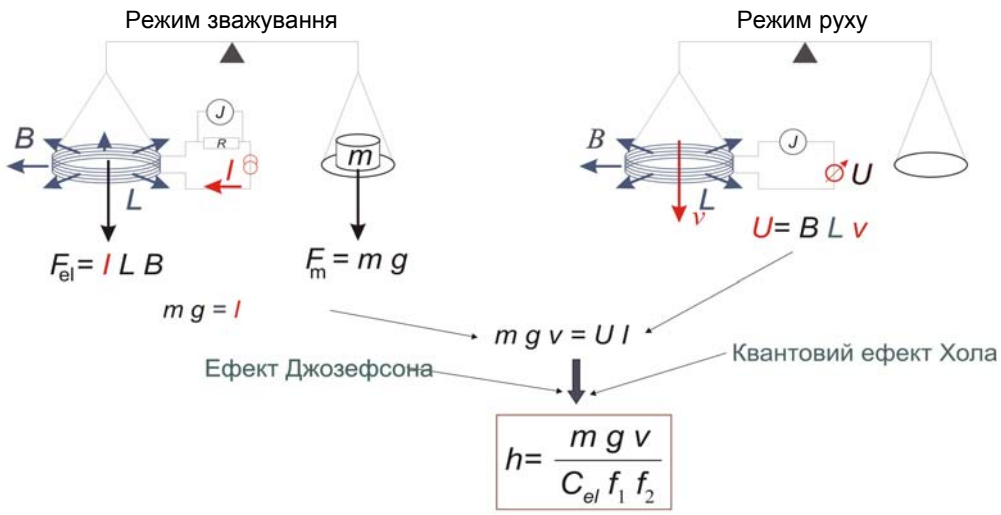

Рис. 4. Режими роботи ват-ваг

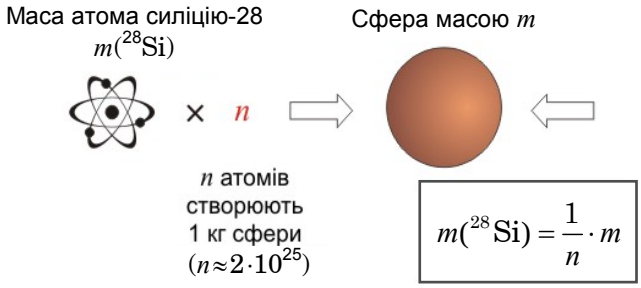

Рис. 5. Зв'язок маси атома силіцію-28 з ІРК

товлено таким чином, щоб після обробки він став сферою з масою приблизно в 1 кг. Його фактичну масу m було визначено по відношенню до еталона завдяки серії циклів зважування.

Відношення $(^{28}\mathrm{Si})/m(\mathrm{IPK})$ визначалося з цього експерименту таким чином:

$$\frac{m(^{28}\mathrm{Si})}{m(\mathrm{IPK})} = \frac{1}{n} \cdot m / \text{кг}.$$

Експеримент складався з вимірювання m/n з високою точністю, а це надзвичайно складне завдання [9].

Учасники Співробітництва Авогадро визначили середнє m/n у двох різних кристалічних сферах зі стандартною відносною невизначеністю $3 \cdot 10^{-8}$.

В існуючій системі SI значення $M(^{12}\mathrm{C})$ визначається точно як 0,012 кг/моль. Таким чином, вимірювання $m(^{12}\mathrm{C})$ з відносною невизначеністю $u_r(m(^{12}\mathrm{C}))$ може бути описано, як вимірювання N_A, що має таку ж відносну невизначеність. З результатів вимірювань в атомній фізиці співвідношення маси $m(^{28}\mathrm{Si})/m(^{12}\mathrm{C})$ вже відомо з дуже малою невизначеністю. Тому вимірювання $m(^{28}\mathrm{Si})$ може бути легко перераховано в значення N_A.

Висновки

Немає сумнівів, що перевизначення кілограма бажане з точки зору фундаментальної фізики. Але практичні наслідки перевизначення мають бути ретельно продумані заздалегідь, щоб уникнути негативних наслідків не тільки для високоточного рівня вимірювань маси, але також і для системи одиниць SI в цілому. Маючи на увазі дуже велику кількість приладів для зважування, компараторів маси і еталонних гир, що використовуються в торгівлі, індустрії та науці, а також у повсякденному житті, негативні результати можливі через передчасність або навіть неправильні рішення.

Чинне визначення кілограма цілком успішно існує. Еталони маси і ваг відповідних класів E_1, E_2 і навіть вище відкалібровані і використовуються на світовому ринку без будь-яких проблем [10]. Сертифікати калібровки в рамках Угоди CIPM MRA досягли високого рівня всесвітнього визнання.

Повне вивчення реалізації, ланцюгів простежуваності і поширення невизначеності для перевизначеного кілограма показує, що:

якщо всі рекомендації ССМ дотримані, то ніяких суттєвих змін у калібрувальному ланцюзі еталонів маси не буде, включаючи високоточні еталони маси і гир класу E_1;

якщо рекомендації ССМ не будуть дотримані, еталони маси високої точності з відносною похибкою меншою або рівною $4 \cdot 10^{-8}$, як тепер пропонують НМІ, більше не будуть доступні;

буде ризик, що акредитовані калібрувальні лабораторії більше не будуть спроможні калібрувати гири класу E_1 відповідно до Рекомендації OIML 111.

Якщо порівняти довгострокові зміни маси платиново-іридієвого прототипу кілограма зі значеннями h або N_A, які були встановлені CODATA протягом минулих 12 років, видно, що тільки за 4 останніх роки ці значення CODATA відрізняються приблизно на $1 \cdot 10^{-7}$. Цей результат у два рази гірший, ніж припустима нестабільність ІРК протягом минулих 100 років (рис. 1). Це може призвести до того, що після кожної зміни значень h або N_A відповідні сертифікати калібрувань будуть недійсними.

Список літератури

1. www.bipm.org/utils/en/pdf/metre_convention.pdf.
2. *Maxwell J.C.* Address to the mathematical and physical sections of the British association / J.C. Maxwell // British Association Report. – Liverpool, 1870. – Vol. XL. Reproduced in: The scientific papers of James Clerk Maxwell. – 1890. – Vol. 2, ed WD Niven (Cambridge: Cambridge University Press). – 225 p.
3. *Girard G.* The third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988–1992) / G. Girard // Metrologia. – 1994. – Vol. 31. – P. 317–336.
4. CCU, Draft chapter 2 for SI brochure, following redefinitions of the base units, 29 September 2010. (http://www.bipm.org/en/si/new_si/).
5. Uncertainty improvements of the NIST electronic kilogram / R.L. Steiner, E.R. Williams, R. Liu, D.B. Newell // IEEE trans. instrum. meas. – 2007. – Vol. 56. – P. 592–596.
6. Determination of the Avogadro constant by counting the atoms in a ^{28}Si crystal / B. Andreas, Y. Azuma, G. Bartl [et al.] // Phys. rev. lett. – 2011. – Vol. 106. – 030801.
7. Reconciling Planck constant determinations via watt balance and enriched-silicon measurements at NRC Canada / A.G. Steele, J. Meija, C.A. Sanchez [et al.] // Metrologia. – 2012. – Vol. 49. – P. L8–L10.
8. OIML R 111-1 Weights of classes E_1, E_2, F_1, F_2, M_1, $M_{1\text{-}2}$, M_2, $M_{2\text{-}3}$ and M_3. Part 1: Metrological and technical requirements (www.oiml.org/publications/R/R111-1-e04.pdf).
9. http://www.ptb.de/en/aktuelles/archiv/presseinfos/pi2011/pitext/pi110127.html.
10. Redefinition of the kilogram and the impact on its future dissemination / M. Glaser, M. Borys, D. Ratschko, R. Schwartz // Metrologia. – 2010. – Vol. 47. – P. 419–428.