

DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-2-5-11

ПЕРЕОПРЕДЕЛЕНИЕ МОЛЯ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ АНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

© Леонид Алексеевич Конопелько, Рувим Лазаревич Кадис,
Юрий Анатольевич Кустиков

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева (ВНИИМ), Санкт-Петербург, Россия; e-mail: fhi@b10.vniim.ru; rkadis@b10.vniim.ru

*Статья поступила 13 ноября 2018 г. Поступила после доработки 13 ноября 2018 г.
Принята к публикации 19 декабря 2018 г.*

Переопределение основных единиц Международной системы единиц (СИ) — килограмма, моля, ампера и кельвина, — которые выражаются теперь через фундаментальные физические константы, означает серьезную реформу СИ. В частности, новое определение моля, фиксирующее значение числа Авогадро, устанавливает единицу количества вещества, не зависящую от единицы массы. Данная статья имеет целью обсуждение последствий переопределения моля и килограмма и акцентирует внимание на неопределенности измерений количества вещества и производных величин, важных для выражения состава смесей. Подробно рассмотрен вопрос о молярной массе вещества и связанной с ней неопределенности. Отмечается, что вычисление молярной массы с использованием относительных атомных масс включает константу молярной массы, которая в новой СИ уже не равна точно 1 г/моль. Это вносит дополнительную, хотя и очень небольшую неопределенность, не превышающую в относительном выражении $1 \cdot 10^{-9}$. Проанализирован бюджет неопределенности измерений количества вещества через измерение массы, когда оно выполняется с наивысшей точностью. Показано, что для веществ, степень чистоты которых $\geq 99,98\%$, неопределенность, связанная с чистотой вещества, сравнима с неопределенностью относительных атомных масс элементов. Для высокочистых веществ наибольшей окажется неопределенность в значениях относительных атомных масс. В любом случае неопределенность, связанная с константой молярной массы, на три порядка величины меньше ближайшего по значению вклада в неопределенность, обусловленного взвешиванием. В случае производных величин, представляющих собой отношение двух одноименных величин, дополнительная неопределенность вообще не возникает. Это продемонстрировано на примере вычисления мольной доли компонента в газовой смеси, приготовленной гравиметрическим методом.

Ключевые слова: аналитические измерения; количество вещества; Международная система единиц (СИ); моль; мольная доля; молярная масса; неопределенность измерений.

REDEFINITION OF THE MOLE AND UNCERTAINTY OF ANALYTICAL MEASUREMENTS

© Leonid A. Konopel'ko, Rouvim L. Kadis, Yury A. Kustikov

D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, Russia; e-mail: fhi@b10.vniim.ru; rkadis@b10.vniim.ru

Received November 13, 2018. Revised November 13, 2018. Accepted December 19, 2018.

Redefinition of the basic units of the International System of Units (SI) — the kilogram, mole, ampere, and kelvin, — which are now expressed in terms of fundamental physical constants means a substantial revision of the system. In particular, the new definition of the mole fixing the value of the Avogadro constant sets a unit of the amount of substance, which is independent of the unit of mass. We consider some consequences of redefining (the mole and kilogram) and focus on the uncertainty of measuring the amount of substance and related quantities which are important for description of the mixture composition. The issue regarding the molar mass of the substance and associated uncertainty is considered in detail. It is noted that calculation of the molar mass using relative atomic masses, involves the molar mass constant which is not equal exactly to 1 g/mol in the new SI. This introduces an additional, though very small, uncertainty of less than 1×10^{-9} in relative terms. The budget of uncertainty for the amount of sub-

stance determined through the mass measurements when the mass is measured with the highest accuracy is scrutinized. It is demonstrated that for substances of less than 99.98% purity, the uncertainty associated to the purity is comparable to that of relative atomic masses of the elements. For high-purity substances, the uncertainty in the relative atomic masses have the largest contribution to the budget. Anyhow, the uncertainty associated to the molar mass constant is three orders of magnitude less than the nearest contribution to the uncertainty attributed to weighing. In the case of derived quantities which are the ratio of two quantities of the same kind, the additional uncertainty does not arise at all. This is illustrated by the calculation of the mole fraction of a component in the gravimetrically prepared gas mixture.

Keywords: amount of substance; analytical measurement; International System of Units (SI); mole; mole fraction; molar mass; measurement uncertainty.

26-я Генеральная конференция по мерам и весам, состоявшаяся 13 – 16 ноября 2018 г., приняла резолюцию, закрепляющую новые определения четырех основных единиц Международной системы единиц (СИ) — килограмма, моля, ампера и кельвина. Тем самым осуществляется серьезная реформа СИ, состоящая в переопределении основных единиц, которые выражаются теперь через фундаментальные физические константы: килограмм — через постоянную Планка, ампер — через величину элементарного заряда, кельвин — через постоянную Больцмана, а моль — через число Авогадро. С этой целью для каждой из названных физических постоянных принимается фиксированное значение, соответствующее наиболее точным измерениям. Предполагается, что переход на реформированную СИ произойдет в Международный день метрологии 19 мая 2019 г.

Данная статья, которая имеет целью обсуждение последствий новых определений моля и килограмма, акцентирует внимание на неопределенности измерений количества вещества и производных величин, таких как мольная доля, — измерений, которые на практике часто осуществляются через измерение массы. Такого рода измерения, составляющие сущность химического анализа, на языке метрологии принято называть аналитическими.

Количество вещества имеет первостепенное значение в химии и химической метрологии. Оно было принято в качестве одной из семи основных величин Международной системы величин в 1971 г. 14-й Генеральной конференцией по мерам и весам. Одновременно была установлена основная единица количества вещества, моль, которая должна была устранить путаницу между единицей эквивалентной массы, грамм-моль, и единицей массы, грамм. Термин «моль» (Mol, mole) появился еще в конце XIX века (впервые в книге Нернста [1]) как сокращение от «грамм-моль» («g-mole», «g-molecule», «g-atom», «g-equivalent»).

Принятое в 1971 г. определение моля, состоящее из двух параграфов, гласит:

1. Моль есть количество вещества системы, содержащей столько структурных элементов, сколько атомов содержится в углероде-12 массой 0,012 кг; обозначение — «моль» («mol»).

2. При применении моля структурные элементы должны быть указаны конкретно. Это могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны, другие частицы или определенные группы частиц.

Таким образом, моль выражает количество вещества через число атомов, содержащихся в строго определенной массе углерода-12. За этим стоит принятое ранее соглашение о выборе относительной атомной массы (известной также как «атомный вес») изотопа углерода-12 ($A_r(^{12}\text{C})$), точно равной 12, — это соглашение является основой используемой сегодня шкалы атомных и молекулярных весов [2]. Легко заметить, что в приведенном определении моля единица одной величины, количества вещества, опирается на единицу другой величины, массы, т.е. на Международный прототип килограмма. Желание «отстроиться» от килограмма явилось одной из причин начатой в 2009 – 2011 гг. реформы по переопределению моля и других единиц [3].

Новое определение моля, утвержденное Решением 106-го заседания Международного комитета по мерам и весам (октябрь 2017 г.) [4] и рекомендованное ИЮПАК [5], таково:

Моль, обозначение — «моль» («mol»), есть единица количества вещества в СИ. Один моль содержит точно $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ структурных элементов. Это число есть зафиксированное числовое значение постоянной Авогадро, N_A , выраженное в моль⁻¹ и называемое числом Авогадро.

Количество вещества, обозначение — n , системы является мерой числа конкретных структурных элементов. Структурными элементами могут быть атомы, молекулы, ионы, электроны, другие частицы или определенные группы частиц.

Это определение ясно показывает, что количество вещества и масса — это разные величины. Кроме того, оно ликвидирует двойственность,

имевшую место при описании объекта в терминах количества вещества и числа частиц. Теперь это одно и то же — количество вещества является мерой числа частиц.

Следует обратить внимание на несколько важных положений, касающихся количества вещества.

1. Терминология. Хотя полное наименование величины есть *количество вещества*, слово *вещество* здесь просто «заполняет место», и его нужно заменять на наименование конкретного вещества. Например, следует говорить о *количестве воды*, $n(\text{H}_2\text{O})$, а не о *количестве вещества воды*.

2. Количество B , $n(B)$, пропорционально числу частиц B , $N(B)$, так что

$$n(B) = N_A^{-1}N(B). \quad (1)$$

Коэффициент пропорциональности в (1) представляет собой универсальную физическую константу, которая не зависит от природы вещества. Величина, обратная коэффициенту пропорциональности, есть постоянная Авогадро, одинаковая для всех веществ. Число Авогадро — это фиксированное числовое значение постоянной Авогадро, $N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$, которое установлено Специальной рабочей группой CODATA по фундаментальным константам [6].

3. Количество B , $n(B)$, также пропорционально массе B , $m(B)$, так что

$$n(B) = M(B)^{-1}m(B). \quad (2)$$

Величина, обратная коэффициенту пропорциональности, есть молярная масса, $M(B)$, которая является характерной константой вещества B .

Как и прежде, молярную массу $M(B)$ любого вещества B можно вычислить исходя из его относительной атомной массы («атомного веса»), $A_r(B)$, по уравнению

$$M(B) = A_r(B)M_u, \quad (3)$$

где $M_u = 1$ г/моль есть константа молярной массы, равная $M(^{12}\text{C})/12$. Важно, что молярная масса углерода-12, $M(^{12}\text{C})$, теперь не равна точно 12 г/моль, как это было принято до сих пор, и, следовательно, константа молярной массы не равна точно 1 г/моль. Это означает, что в значении этой константы появляется некоторая, хотя и очень небольшая, неопределенность.

Молярная масса $M(B)$ вещества B связана с массой атомов (структурных элементов) $m_a(B)$ аналогичным соотношением

$$M(B) = N_A m_a(B) = N_A A_r(B) m_u, \quad (4)$$

где $m_u = 1$ г — это константа атомной массы, равная массе атома углерода-12, деленной на 12, т.е. $m_a(^{12}\text{C})/12$. Неопределенность константы

атомной массы — эта неопределенность не равна нулю в действующей системе — также изменяется при переходе к новой СИ, так как меняется (уменьшается) неопределенность килограмма как единицы массы.

На практике при вычислении молярных масс константы M_u и m_u обычно опускают, однако их включение в уравнения (3) и (4) важно не только с точки зрения размерности величин, но и с точки зрения анализа неопределенности значений молярной массы.

В табл. 1 приведены относительные стандартные неопределенности трех наиболее важных величин, связанных с вычислением молярных масс, — числа Авогадро, константы молярной массы и константы атомной массы при старом и новом подходах к определению килограмма и моля. Нулевые неопределенности для M_u и N_A в таблице вытекают из принятия фиксированных значений молярной массы углерода-12 и числа Авогадро соответственно. Ненулевые неопределенности получены из анализа результатов экспериментальных исследований, которые обобщены в публикации [6].

Для того, чтобы судить о последствиях перехода к новым определениям моля и килограмма для химической метрологии, нужно рассмотреть влияние этого перехода на следующие величины:

$A_r(X)$ — относительная атомная масса элемента X ;

$A_r(B)$ — относительная атомная масса вещества B ;

m_u — константа атомной массы;

M_u — константа молярной массы;

N_A — число Авогадро;

$m_a(B)$ — масса атомов вещества B ;

$M(B)$ — молярная масса вещества B ;

$n(B)$ — количество вещества B , вычисляемое как частное от деления массы вещества $m(B)$, определяемой взвешиванием, на его молярную массу $M(B)$.

Величины $A_r(X)$ и $A_r(B)$, стоящие в начале этого списка, являются относительными. Их значения и неопределенности не зависят от способа определения СИ. В частности, табулированные значения атомных весов элементов, публику-

Таблица 1. Относительные стандартные неопределенности числа Авогадро, $u_r(N_A)$, константы молярной массы, $u_r(M_u)$, и константы атомной массы, $u_r(m_u)$, при двух подходах к определению килограмма и моля (с сокращениями из работы [7])

Система единиц	$u_r(N_A)$	$u_r(M_u)$	$u_r(m_u)$
Нынешняя СИ	$12 \cdot 10^{-9}$	0	$12 \cdot 10^{-9}$
Новая СИ	0	$0,45 \cdot 10^{-9}$	$0,45 \cdot 10^{-9}$

емые ИЮПАК, не зависят от выбора соответствующей строки в табл. 1.

В соответствии с принципами, лежащими в основе переопределения единиц СИ, нынешние значения всех величин в списке остаются неизменными, но их неопределенности будут иными. Как видно из табл. 1, относительные неопределенности в значениях N_A и m_u будут существенно меньше нынешних — неопределенность в N_A будет вообще нулевой. Следовательно, атомные массы (в граммах) в новой СИ будут иметь меньшие неопределенности. При этом значения атомных масс нуклидов, выраженные в атомных единицах массы, остаются неизменными.

Константа молярной массы M_u приобретает в новой СИ относительную стандартную неопределенность, равную $0,45 \cdot 10^{-9}$. Поскольку молярная масса вещества $M(B)$ представляет собой произведение $A_r(B)M_u$, все молярные массы получают эту дополнительную неопределенность.

Наконец, неопределенность в количестве вещества $n(B)$, как это следует из уравнения (2), зависит от относительных неопределенностей в числителе и знаменателе этого отношения. Очевидно, что результирующая неопределенность определяется в первую очередь числителем (2) — а именно, химической чистотой вещества и точностью взвешивания. Для особо точных работ следует учитывать также изменения в распространности изотопов, влияющие на значение молярной массы (см. далее). Однако **дополнительной неопределенностью менее $1 \cdot 10^{-9}$, которая появляется в знаменателе, в любом случае можно пренебречь.**

Принципиальным остается вопрос о вычислении молярных масс химических соединений в новой СИ. Строго говоря, молярные массы, выраженные в г/моль, уже не будут численно равны «атомным весам», причем расхождение между этими величинами должно составлять менее чем

1 часть на 10^9 . Это обстоятельство вызвало споры в литературе. Будет ли по-прежнему использоваться простое выражение $M(B) = A_r(B)M_u$, если M_u уже не равна точно 1 г/моль? Так появилось предложение [8] ввести в эту формулу «поправочный множитель» κ (каппа):

$$M(B) = (1 + \kappa)A_r(B)M_u. \quad (5)$$

Это позволяет оставить за M_u ее точное значение 1 г/моль, а κ может считаться равным нулю в пределах все той же неопределенности — менее чем 1 часть на 10^9 . Однако, с другой стороны, переход к уравнению (5) нелогичен, так как уравнение (3), как было сказано выше, должно сохраниться в новой СИ. В итоге предложение о введении поправочного множителя не получило поддержки. Константа молярной массы M_u в уравнении (3) имеет на сегодняшний день относительную стандартную неопределенность $0,45 \cdot 10^{-9}$.

Может ли нас беспокоить расхождение в молярных массах веществ на уровне 1 часть на 10^9 ?

Чтобы ответить на этот вопрос, имеет смысл рассмотреть бюджет неопределенности измерений количества вещества. Следуя уравнениям (2) и (3), относительная неопределенность $u_r(n(B))$ складывается из следующих составляющих:

$$u_r(n(B)) = \sqrt{u_r^2(m(B)) + u_r^2(A_r(B)) + u_r^2(M_u)}, \quad (6)$$

где первое, второе и третье слагаемые под корнем представляют собой квадраты относительных неопределенностей массы вещества B , его относительной атомной массы и константы молярной массы. В свою очередь неопределенность массы $u_r(m(B))$ определяется неопределенностью взвешивания $u_r(w)$ и неопределенностью, связанной с чистотой вещества, $u_r(p(B))$:

$$u_r(m(B)) = \sqrt{u_r^2(w) + u_r^2(p(B))}. \quad (7)$$

Чтобы судить о вкладе $u_r(M_u)$, рассмотрим оценки составляющих неопределенности измерений количества вещества (см. уравнения (6) и (7)), отвечающих наивысшей точности, когда неопределенность взвешивания минимальна. Бюджет неопределенности таких измерений представлен в табл. 2.

Оценки составляющих неопределенности в правой колонке таблицы получены с учетом следующих соображений.

1. В качестве минимальной оценки неопределенности взвешивания принята неопределенность массы эталонной гири класса точности E1 номинальной массой 10 г с пределом допускаемых отклонений от номинального значения

Таблица 2. Бюджет неопределенности измерений количества вещества через измерение массы

Составляющая неопределенности	Относительная стандартная неопределенность
Масса вещества:	
взвешивание $u_r(w)$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
степень чистоты $u_r(p(B))$	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Относительная атомная масса $u_r(A_r(B))$	$0,6 \cdot 10^{-4}$
Константа молярной массы $u_r(M_u)$	$0,45 \cdot 10^{-9}$
Относительная суммарная стандартная неопределенность $u_r(n(B))$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
Относительная расширенная неопределенность $U_r(n(B))$ ($k = 2$)	$2,4 \cdot 10^{-4}$

массы, равным 0,020 мг [9]. Относительная стандартная неопределенность массы гири в предположении равномерного распределения вероятности составляет $\frac{0,020}{10 \cdot 10^3 \sqrt{3}} = 1,2 \cdot 10^{-6}$.

2. Относительная стандартная неопределенность на уровне $1,0 \cdot 10^{-4}$, связанная с чистотой вещества, считается нижним пределом этой составляющей неопределенности для чистых веществ в большинстве случаев [10, разд. 4.1]. Если принять, что эта неопределенность выражается формулой $u_r(p(B)) = \frac{100-p}{2p}$, значение неопределенности $1,0 \cdot 10^{-4}$ отвечает степени чистоты $p = 99,98 \%$, что характеризует относительно высокий уровень чистоты материала. Мы не рассматриваем здесь высокочистые вещества (преимущественно металлы), степень чистоты которых составляет 99,999 % и выше [11]. Для таких веществ соответствующая неопределенность должна быть снижена до уровня $0,5 \cdot 10^{-5}$ и ниже. Наоборот, для сложных органических веществ ситуация обычно гораздо хуже. Степень чистоты большинства органических веществ, аттестованных как SRM (NIST), не превышает 99,8 % (см. [12, разд. 7]).

3. Отдельного рассмотрения заслуживают неопределенности относительных атомных масс («атомных весов») элементов, $u_r(A_r(B))$, входящие в уравнение (6). Ввиду колебаний изотопного состава элементов в различных встречающихся в природе материалах атомные веса элементов не являются постоянными. Это нашло отражение в Таблицах атомных весов элементов [13], публикуемых каждые два года Комиссией ИЮПАК по атомным весам и распространенности изотопов. Начиная с 2009 г. атомные веса ряда элементов с двумя и более стабильными изотопами представлены в Таблицах в виде интервалов, охватывающих колебания атомных весов этих элементов в нормальных материалах. Эти колебания превышают неопределенности собственно измерений атомных весов методами масс-спектрометрии. Под «нормальным» понимается материал земного происхождения, который может служить источником данного элемента или его соединений в торговле, промышленности или науке, причем этот материал не исследовали на предмет какой-то экстраординарной аномалии... [13].

Из 12 элементов (B, Br, C, Cl, H, Li, Mg, N, O, S, Si, и Tl), стандартные атомные веса которых в последнем (2013 г.) издании Таблиц [13] представлены в виде интервалов, мы выбрали пять: углерод, хлор, водород, азот и кислород (табл. 3). Интерпретация границ этих интервалов $[a, b]$ как границ равномерного распределения, как это

обсуждается в публикации [14], дает значение относительной стандартной неопределенности $u_r = (b-a)/(b+a)\sqrt{3}$ для каждого элемента. Значение $0,6 \cdot 10^{-4}$, которое приведено в бюджете, получено как среднее квадратическое найденных значений $u_r(A_r(B))$ для пяти элементов.

Как следует из табл. 2, составляющие неопределенности $u_r(p(B))$ и $u_r(A_r(B))$ являются доминирующими в бюджете. Для веществ, степень чистоты которых $\leq 99,98 \%$, неопределенность, связанная с чистотой вещества, оказывается сравнимой с неопределенностью относительных атомных масс элементов. В случае высокочистых веществ, для которых эта составляющая неопределенности будет существенно меньше, на первом месте окажется неопределенность в значениях относительных атомных масс. В любом случае дополнительная неопределенность, связанная с тем, что константа молярной массы в новой СИ не равна точно единице, на три порядка величины меньше ближайшего по значению вклада в суммарную неопределенность, обусловленного взвешиванием.

Чтобы лучше представить себе уровень точности, о котором идет речь, авторы отчета [7] вслед за авторами работы [15] отмечают, что это тот уровень, на котором уже не выполняется привычное нам предположение о сохранении массы в химических реакциях. Действительно, атомные массы элементов характеризуют несвязанные атомы, а энергия, выделяющаяся при образовании связей, ведет к потере массы в соответствии с формулой Эйнштейна $E = mc^2$. Таким образом, масса химического соединения не равна массе составляющих его атомов. Например, разница между молярной массой связанных в кристаллическом графите и несвязанных атомов углерода-12 составляет 7 частей на 10^{10} [7], т.е. относительное отклонение в молярной массе составляет $0,7 \cdot 10^{-9}$ — значение, которое мы не учитываем в практической работе.

Изложенное относится к тем последствиям переопределения моля, которые следует ожидать при измерении количества вещества как основ-

Таблица 3. Атомные веса пяти элементов и их неопределенности

Элемент	Интервал атомных весов $[a, b]$	Относительная стандартная неопределенность $u_r(A_r(B))$
C	[12,0096, 12,0116]	$0,48 \cdot 10^{-4}$
Cl	[35,446, 35,457]	$0,90 \cdot 10^{-4}$
H	[1,00784, 1,00811]	$0,77 \cdot 10^{-4}$
N	[14,00643, 14,00728]	$0,18 \cdot 10^{-4}$
O	[15,99903, 15,99977]	$0,13 \cdot 10^{-4}$

ной величины. Очень часто химический состав выражают производными величинами, которые представляют собой отношение двух одноименных величин. Примером может служить мольная доля компонента — принятый способ выражения состава газовых смесей, закрепленный Государственной поверочной схемой для средств измерений содержания компонентов в газовых средах [16]. Мольная доля компонента используется для выражения состава при гравиметрическом приготовлении газовых смесей [17], используемых для поверки и калибровки газоаналитической аппаратуры.

Рассмотрим простейший случай приготовления газовой смеси гравиметрическим методом путем смешения двух газов А и В с мольной долей основного компонента x_{1A} в газе А и x_{2B} в газе В и массами этих газов m_A и m_B соответственно. Практически важный пример такого рода — это разбавление кислорода азотом. Следуя общему выражению для мольной доли компонента в смеси (уравнение (3) в стандарте [17]), пренебрегая встречающимися примесями, запишем выражения для мольной доли кислорода, x_1 , и азота, x_2 , в смеси двух газов:

$$x_1 = \frac{\frac{m_A}{M_1}}{\frac{m_A}{x_{1A} M_1} + \frac{m_B}{x_{2B} M_2}};$$

$$x_2 = \frac{\frac{m_B}{M_2}}{\frac{m_A}{x_{1A} M_1} + \frac{m_B}{x_{2B} M_2}}. \quad (8)$$

В этих формулах M_1 и M_2 — молярные массы кислорода и азота соответственно. С учетом того, что $M_1 = A_r(1)M_u$ и $M_2 = A_r(2)M_u$, а константа молярной массы M_u одинакова для всех веществ, получаем:

$$x_1 = \frac{\frac{m_A}{A_r(1)}}{\frac{m_A}{x_{1A} A_r(1)} + \frac{m_B}{x_{2B} A_r(2)}};$$

$$x_2 = \frac{\frac{m_B}{A_r(2)}}{\frac{m_A}{x_{1A} A_r(1)} + \frac{m_B}{x_{2B} A_r(2)}}. \quad (9)$$

Легко видеть, что константа молярной массы M_u (вместе со своей неопределенностью) не входит в выражения для мольной доли компонента в смеси. Это означает, что величины, представ-

ляющие собой отношение, такие как мольная доля или доля числа частиц компонента, инвариантны к выбору определения единицы количества вещества. Переопределение моля в принципе не влияет на неопределенность измерений этих величин.

Итак, при измерении количества вещества и связанных с ним производных величин, таких как молярная концентрация или молярное содержание компонента, дополнительная неопределенность в значениях молярных масс, возникающая при переходе к новой СИ, настолько мала, что этот переход практически не может повлиять на неопределенность измерений. При измерении производных величин, которые представляют собой отношение одноименных величин, дополнительная неопределенность вообще не возникает. Поэтому нет оснований опасаться, что переопределение моля может каким-то образом повлиять на точность аналитических измерений, как массовых, выполняемых в аналитических лабораториях, так и измерений высшего уровня, которые выполняются метрологическими институтами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Нернст В. Г.** Теоретическая химия с точки зрения Закона Avogadro и термодинамики. Пер. с 3-го нем. изд. — СПб., 1904. — 619 с.
2. **De Laeter J. R., Böhlke J. K., De Bièvre P., et al.** Atomic weights of the elements: Review 2000 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2003. Vol. 75. N 6. P 683 – 800.
3. **Milton M. J. T., Mills I. M.** Amount of substance and the proposed redefinition of the mole / Metrologia. 2009. Vol. 46. N 3. P 332 – 338.
4. International Committee for Weights and Measures (CIPM). Proc. of the 106th meeting of the CIPM (16 – 17 and 20 October 2017). Decision CIPM/106-10. <http://www.bipm.org/en/committees/cipm/meeting/106.html> (2017) (дата обращения 13.11.18).
5. **Marquardt R., Meija J., Mester Z., et al.** Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017) / Pure Appl. Chem. 2018. Vol. 90. N 1. P 175 – 180.
6. **Newell D. B., Cabiati F., Fischer J., et al.** The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI / Metrologia. 2018. Vol. 55. N 1. L13 – L16.
7. **Marquardt R., Meija J., Mester Z., et al.** A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2017. Vol. 89. N 7. P 951 – 981.
8. **Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., et al.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) / Metrologia. 2006. Vol. 43. N 3. P 227 – 246.
9. ГОСТ 7328–2001. Гири. Общие технические условия. — Минск, 2001. — 11 с.
10. CIPM. Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM). Mise en pratique for the definition of the mole in the SI. http://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/22/CCQM16-04_Mole_m_en_p_draft_2018.pdf (дата обращения 13.11.18).
11. **Лазукина О. П., Волкова Е. Н., Малышев К. К., Чурбанов М. Ф.** Современный уровень чистоты простых веществ / Тезисы доклада на XX Менделеевском съезде по общей и прикладной химии, Екатеринбург, 2016. Т. 2а. Химия и технология материалов, включая наноматериалы. С. 410.
12. NIST Special Publication 1012. An approach to the metrologically sound traceable assessment of the chemical purity of orga-

- nic reference materials. U. S. Department of Commerce, Technology Administration. — Nat. Inst. Stand. Technol., Sept. 2004.
13. **Meija J., Coplen T. B., Berglund M., et al.** Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2016. Vol. 88. N 3. P 265 – 291.
 14. **Possolo A., Van der Veen A. M. H., Meija J., Hibbert D. B.** Interpreting and propagating the uncertainty of the standard atomic weights (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2018. Vol. 90. N 2. P 395 – 424.
 15. **Davis R. S., Milton M. J. T.** The assumption of the conservation of mass and its implications for present and future definitions of the kilogram and the mole / Metrologia. 2014. Vol. 51. N 3. P 169 – 173.
 16. ГОСТ 8.578–2014. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. — М.: Стандартинформ, 2014. — 14 с.
 17. ГОСТ Р ИСО 6142–2008. Анализ газов. Приготовление градуировочных газовых смесей. Гравиметрический метод. — М.: Стандартинформ, 2009. — 31 с.
 7. **Marquardt R., Meija J., Mester Z., et al.** A critical review of the proposed definitions of fundamental chemical quantities and their impact on chemical communities (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2017. Vol. 89. N 7. P 951 – 981.
 8. **Mills I. M., Mohr P. J., Quinn T. J., et al.** Redefinition of the kilogram, ampere, kelvin and mole: a proposed approach to implementing CIPM recommendation 1 (CI-2005) / Metrologia. 2006. Vol. 43. N 3. P 227 – 246.
 9. Interstate Standard GOST 7328–2001. Weights. General specifications. — Minsk, 2001. — 11 p. [in Russian].
 10. CIPM. Consultative Committee for Amount of Substance: Metrology in Chemistry and Biology (CCQM). Mise en pratique for the definition of the mole in the SI. http://www.bipm.org/cc/CCQM/Allowed/22/CCQM16-04_Mole_m_en_p_draft_2018.pdf (accessed November 13, 2018).
 11. **Lazukina O. P., Volkova E. N., Malyshev K. K., Churbanov M. F.** Modern level of purity of elementary substances / XX Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. Abstr. book in 5 volumes. — Yekaterinburg, 2016. Vol. 2a. Chemistry and technology of materials and nanomaterials. P. 410 [in Russian].
 12. NIST Special Publication 1012. An approach to the metrologically sound traceable assessment of the chemical purity of organic reference materials. U. S. Department of Commerce, Technology Administration. — Nat. Inst. Stand. Technol., Sept. 2004.
 13. **Meija J., Coplen T. B., Berglund M., et al.** Atomic weights of the elements 2013 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2016. Vol. 88. N 3. P 265 – 291.
 14. **Possolo A., Van der Veen A. M. H., Meija J., Hibbert D. B.** Interpreting and propagating the uncertainty of the standard atomic weights (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2018. Vol. 90. N 2. P 395 – 424.
 15. **Davis R. S., Milton M. J. T.** The assumption of the conservation of mass and its implications for present and future definitions of the kilogram and the mole / Metrologia. 2014. Vol. 51. N 3. P 169 – 173.
 16. Interstate Standard GOST 8.578–2014. State system for ensuring the uniformity of measurements. State hierarchy scheme for measuring instruments for the component content in gaseous media. — Moscow: Standartinform, 2014. — 14 p. [in Russian].
 17. ISO 6142:2001. Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures — Gravimetric method. <https://www.iso.org/ru/standard/24663.html> (accessed November 13, 2018).

REFERENCES

1. **Nernst W.** Theoretische Chemie vom Standpunkte der Avogadro'schen Regel und der Thermodynamik. 2. Aufl. — Stuttgart, 1898. — 703 p.
2. **De Laeter J. R., Böhlke J. K., De Bièvre P., et al.** Atomic weights of the elements: Review 2000 (IUPAC Technical Report) / Pure Appl. Chem. 2003. Vol. 75. N 6. P 683 – 800.
3. **Milton M. J. T., Mills I. M.** Amount of substance and the proposed redefinition of the mole / Metrologia. 2009. Vol. 46. N 3. P 332 – 338.
4. International Committee for Weights and Measures (CIPM). Proceedings of the 106th meeting of the CIPM (16 – 17 and 20 October 2017). Decision CIPM/106-10. <http://www.bipm.org/en/committees/cipm/meeting/106.html> (2017) (accessed November 13, 2018).
5. **Marquardt R., Meija J., Mester Z., et al.** Definition of the mole (IUPAC Recommendation 2017) / Pure Appl. Chem. 2018. Vol. 90. N 1. P 175 – 180.
6. **Newell D. B., Cabiati F., Fischer J., et al.** The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI / Metrologia. 2018. Vol. 55. N 1. L13 – L16.