



**Доклад Рабочей Группы по фундаментальным константам при Комитете по данным в области науки и техники (CODATA)**

Дата: 20 октября 2017

**Значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ ,  
рекомендуемые для пересмотра единиц SI**

# Значения $h$ , $e$ , $k$ и $N_A$ , рекомендуемые для пересмотра единиц SI

## I. ВВЕДЕНИЕ

Если изначально все эталоны единиц SI представляли собой артефакты, постепенно стал происходить переход к новым эталонам, которые позволяют определять значения инвариантных фундаментальных констант и свойств атомов. В настоящее время, последней единицей SI, измерения которой прослеживаются к артефакту, является килограмм. Возможность создания нового эталона килограмма стала обсуждаться около тридцати лет назад. Во время 24-го заседания Генеральной конференции мер и весов (ГКМВ, 2011) была достигнута договоренность о пересмотре единиц SI и создании эталонов, позволяющих определять точные значения постоянной Планка  $h$ , заряда электрона  $e$ , постоянной Больцмана  $k$  и постоянной Авогадро  $N_A$ . Прогресс в точности и согласованности результатов измерений позволил Международному комитету мер и весов (МКМВ) рекомендовать принятие пересмотренных единиц SI (МКМВ, 2017).

Комитет по данным в области науки и техники (CODATA) и в частности его Рабочая группа по фундаментальным константам (TGFC) периодически публикует набор значений основных констант и коэффициентов преобразования в области физики и химии. В связи с этим, ГКМВ обратилась в TGFC с просьбой рассмотреть результаты измерений фундаментальных физических констант и определить методом наименьших квадратов (LSA) сглаженные значения констант, которые можно будет утвердить для принятия пересмотренных единиц SI (ГКМВ, 2011). Значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , и  $N_A$  были определены с точностью до необходимого количества знаков и одобрены на заседании МКМВ (МКМВ, 2016). Эти значения будут представлены 26-ой ГКМВ в ноябре 2018 г. для утверждения пересмотренных единиц SI.

## II. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ CODATA 2017

При вычислении значений, вошедших во внеочередной номер CODATA 2017, использовались и данные, на которых основаны значения, вошедшие в номер CODATA за 2014 год. Что касается данных за более поздний период - после 2014 по 1 июля 2017, наиболее важные из них, в том числе результаты определения констант  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , и  $N_A$ , приведены ниже в таблице 1. Полный перечень данных, которые использовались при подготовке внеочередного номера CODATA 2017, можно найти в таблицах II - V публикации Mohr et al. (2017).

ТАБЛИЦА I Данные, которые использовались для определения значений  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ .

Публикация	Обозначение <sup>a</sup>	Константа <sup>b</sup>	Значение	Относительная стандартная неопределенность, $u_r$
Schlamminger et al. (2015)	NIST-15	$h$	$6.626\ 069\ 36(38) \times 10^{-34}$ Дж с	$5.7 \times 10^{-8}$
Wood et al. (2017)	NRC-17	$h$	$6.626\ 070\ 133(60) \times 10^{-34}$ Дж с	$9.1 \times 10^{-9}$
Haddad et al. (2017)	NIST-17	$h$	$6.626\ 069\ 934(88) \times 10^{-34}$ Дж с	$1.3 \times 10^{-8}$
Thomas et al. (2017)	LNE-17	$h$	$6.626\ 070\ 40(38) \times 10^{-34}$ Дж с	$5.7 \times 10^{-8}$
Azuma et al. (2015)	IAC-11	$N_A$	$6.022\ 140\ 95(18) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	$3.0 \times 10^{-8}$
Azuma et al. (2015)	IAC-15	$N_A$	$6.022\ 140\ 70(12) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	$2.0 \times 10^{-8}$
Bartl et al. (2017)	IAC-17	$N_A$	$6.022\ 140\ 526(70) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	$1.2 \times 10^{-8}$
Kuramoto et al. (2017)	NMIJ-17	$N_A$	$6.022\ 140\ 78(15) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	$2.4 \times 10^{-8}$
Мольдвер et al. (1988)	NIST-88	$R$	$8.314\ 470(15)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$1.8 \times 10^{-6}$
Pitre et al. (2009)	LNE-09	$R$	$8.314\ 467(23)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$2.7 \times 10^{-6}$
Sutton et al. (2010)	NPL-10	$R$	$8.314\ 468(26)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$3.2 \times 10^{-6}$
Pitre et al. (2011)	LNE-11	$R$	$8.314\ 455(12)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$1.4 \times 10^{-6}$
Pitre et al. (2015)	LNE-15	$R$	$8.314\ 4615(84)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$1.0 \times 10^{-6}$
Gavioso et al. (2015)	INRIM-15	$R$	$8.314\ 4743(88)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$1.1 \times 10^{-6}$
Pitre et al. (2017)	LNE-17	$R$	$8.314\ 4614(50)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$6.0 \times 10^{-7}$
Podesta et al. (2017)	NPL-17	$R$	$8.314\ 4603(58)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$7.0 \times 10^{-7}$
Feng et al. (2017)	NIM-17	$R$	$8.314\ 459(17)$ Дж моль <sup>-1</sup> К <sup>-1</sup>	$2.0 \times 10^{-6}$
Gaiser et al. (2017)	PTB-17	$A_g(^4\text{He})/R$	$6.221\ 140(12) \times 10^{-8}$ м <sup>3</sup> К Дж <sup>-1</sup>	$1.9 \times 10^{-6}$
Qu et al. (2017)	NIM/NIST-17	$k/h$	$2.083\ 6630(56) \times 10^{10}$ Гц К <sup>-1</sup>	$2.7 \times 10^{-6}$

<sup>a</sup> IAC - Международный проект «Авогадро»; INRIM - Национальный институт метрологических исследований, Турин, Италия; LNE - Национальная лаборатория метрологии и испытаний, Франция; NIM - Национальный метрологический институт, Пекин; NIST - Национальный институт эталонов и технологии, Гейтерсберг, США; NMIJ - Национальный метрологический институт Японии, Цукуба, Япония; NPL - Национальная Физическая Лаборатория, Теддингтон, Великобритания; NRC - Национальный исследовательский совет Канады, Оттава, Канада; PTB – Физико-технический институт, Брауншвейг и Берлин, Германия

<sup>b</sup>  $h$  - постоянная Планка;  $N_A$  - постоянная Авогадро;  $R$  - молярная газовая постоянная;  $A_e(^4\text{He})/R$  – отношение молярной поляризуемости газа  $^4\text{He}$  к молярной газовой постоянной;  $k/h$  - отношение постоянной Больцмана к постоянной Планка

Полный перечень исходных данных, которые учитывались при подготовке CODATA 2017 можно найти в публикации Mohr et al. (2017).

Для оценки совместимости исходных данных использовался тот же подход, что и ранее (исходные данные согласно публикациям Mohr et al. 2016a, b; Mohr and Taylor 2000, 2005; Mohr et al. 2008a, b, 2012a, b). Подробная информация об оценивании совместимости дана в публикации Mohr et al. (2017). Если говорить в общем, критерием, который TGFC использует для оценивания совместимости исходных данных, является нормированная разность. Нормированная разность представляет собой разность экспериментального и сглаженного значения, деленную на неопределенность экспериментального значения. Если нормированная разность двукратно превышает неопределенность, TGFC идентифицирует все другие исходные данные, связанные с данной константой.

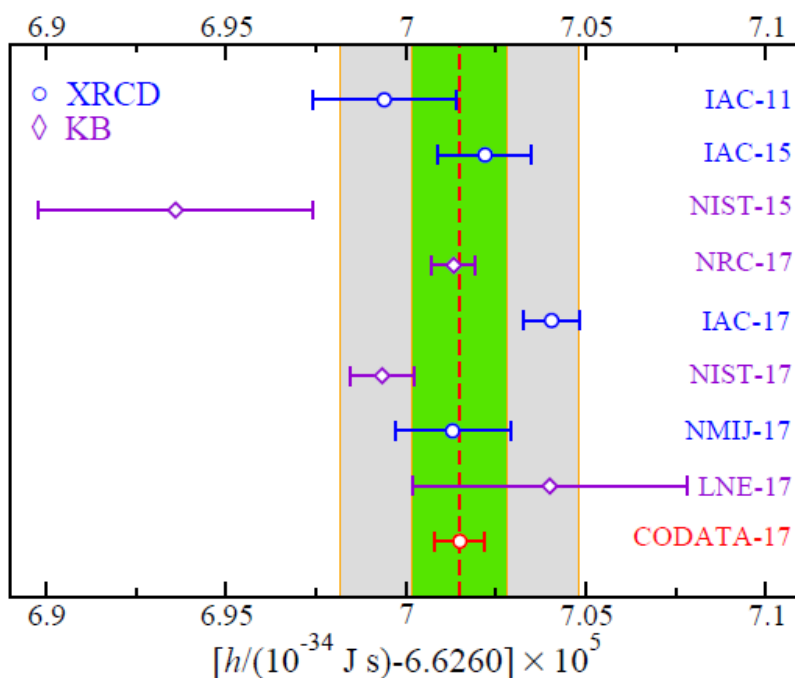
Неопределенности экспериментальных значений умножаются на такой коэффициент, чтобы нормированные разности не превышали двукратное значение неопределенности. В данном конкретном случае корректировка неопределенностей была проведена для значений двух групп, соответствующих двум константам, значения которых вошли в CODATA 2017.

Первая группа включает восемь результатов определения постоянной Планка и постоянной Авогадро, которые указаны в таблице I и которые использовались для вычисления сглаженного значения постоянной Планка, опубликованного в CODATA 2017. Неопределенности этих значений были умножены на коэффициент 1.7. Полученные относительные стандартные неопределенности  $u_r$  пяти из этих восьми значений не превысили ширину половины интервала  $\pm 50 \times 10^{-9}$ . Из этих пяти неопределенностей две не превысили ширину половины интервала  $\pm 20 \times 10^{-9}$ , причем один из соответствующих результатов был получен на ватт-весах, а другой методом рентгеноскопии плотности кристалла кремния (XRCD).

Вторая группа значений, неопределенности которых были увеличены, представляет собой значения других констант, полученные по результатам экспериментального определения относительной атомной массы протона. Удивительно, но и в этом случае требуемый множитель оказался равным 1.7. Увеличение этих неопределенностей никоим образом не повлияло на значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$ , и  $N_A$ , опубликованные в CODATA 2017.

### III. РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КОНСТАНТ

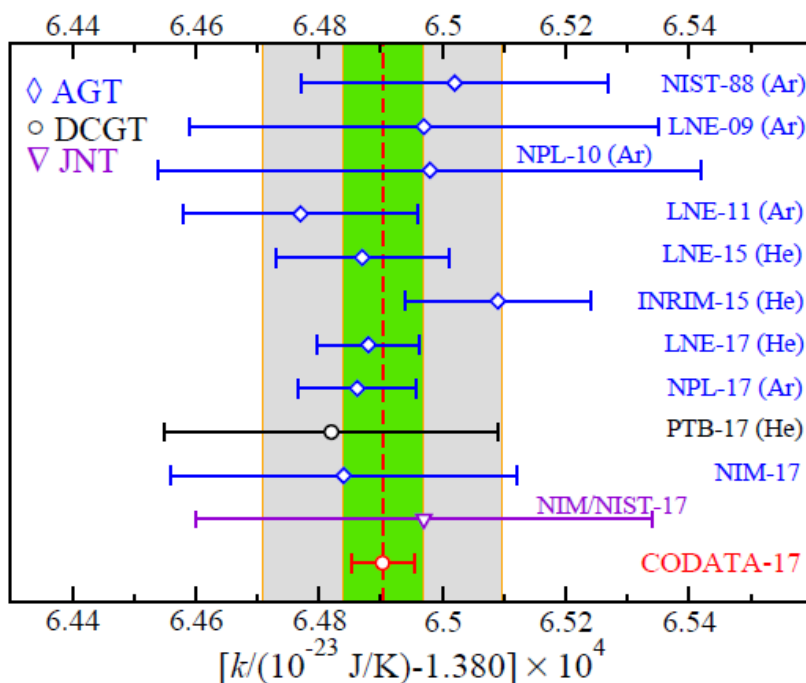
На рисунке 1 показаны экспериментальные значения  $h$  согласно таблице I и расчетное значение, вошедшее во внеочередной номер CODATA 2017.



**Рис. 1:**

Экспериментальные значения постоянной Планка  $h$  согласно таблице I (в хронологической последовательности) и сглаженное значение, опубликованное в CODATA 2017. Внутренний интервал значений, выделенный зеленым цветом, составляет  $\pm 20$  частей на  $10^9$ , а внешний серый интервал составляет  $\pm 50$  частей на  $10^9$ . KB – метод ватт-весов; XRCO – метод рентгенокопии плотности кристалла кремния.

На рисунке 2 показаны экспериментальные значения  $k$  согласно таблице I и расчетное значение, вошедшее во внеочередной номер CODATA 2017.



**Рис. 2:**

Экспериментальные значения постоянной Больцмана  $k$  согласно таблице I (в хронологической последовательности) и сглаженное значение, опубликованное в CODATA 2017. Внутренний интервал значений, выделенный зеленым цветом, составляет  $\pm 5$  частей на  $10^7$ , а внешний серый интервал составляет  $\pm 15$  частей на  $10^7$ . AGT - акустический метод определения температуры газа; DCGT – метод определения температуры газа по диэлектрической проницаемости; JNT - метод определения температуры газа по шуму Джонсона.

В таблице II указаны расчетные значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$  и их неопределенности.

ТАБЛИЦА II Расчетные значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ , опубликованные в CODATA 2017

Величина	Значение	Относительная стандартная неопределенность, $u_r$
$h$	$6.626\ 070\ 150(69) \times 10^{-34}$ Дж с	$1.0 \times 10^{-8}$
$e$	$1.602\ 176\ 6341(83) \times 10^{-19}$ Кл	$5.2 \times 10^{-9}$
$k$	$1.380\ 649\ 03(51) \times 10^{-23}$ Дж К <sup>-1</sup>	$3.7 \times 10^{-7}$
$N_A$	$6.022\ 140\ 758(62) \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>	$1.0 \times 10^{-8}$

Согласно требованию ГКМВ (2011) значения пересмотренных единиц SI должны быть совместимы с принятыми значениями нынешних единиц. В нынешней системе SI приняты следующие значения величин: международный прототип килограмма  $m(K) = 1$  кг, магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Н м<sup>-1</sup>, тройная точка воды  $T_{TPW} = 273.16$  К, масса моля углерода-12,  $M(^{12}\text{C}) = 0.012$  кг×моль<sup>-1</sup>. В новой системе SI значения этих величин будут определяться экспериментальным путем и иметь соответствующую неопределенность. Как отмечено в согласованной рекомендации CCU (МКМВ, 2016), числовые значения  $h$ ,  $e$  и  $N_A$ , принятые в качестве пересмотренных единиц SI должны быть определены с точностью до такого количества знаков, чтобы отклонение расчетных числовых значений  $m(K)$ ,  $\mu_0$  и  $M(^{12}\text{C})$  от соответствующих принятых значений было в пределах относительных стандартных неопределенностей, указанных в CODATA 2017. Для значения постоянной  $k$  должно быть выбрано такое количество знаков после запятой, чтобы отклонение расчетного числового значения температуры тройной точки воды от 273.16 К было в пределах относительной стандартной неопределенности воспроизведения температуры тройной точки воды (CCT, 2017).

Точные числовые значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$ , рекомендуемые для пересмотренных единиц SI приведены в таблице III.

ТАБЛИЦА III Округленные значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  and  $N_A$ , рекомендуемые для пересмотра единиц SI.

Величина	Значение
$h$	$6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34}$ Дж с
$e$	$1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ Кл
$k$	$1.380\ 649 \times 10^{-23}$ Дж К <sup>-1</sup>
$N_A$	$6.022\ 140\ 76 \times 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогресс, достигнутый к настоящему моменту времени, позволяет считать выполненными условия, установленные для перехода к новым единицам SI на основе точных значений фундаментальных констант. Рекомендуемые числовые значения  $h$ ,  $e$ ,  $k$  и  $N_A$  для соответствующих единиц SI уже определены. Полный перечень данных, которые использовались при вычислении значений, вошедших во внеочередной номер CODATA 2017, можно найти в публикации Mohr et al. (2017). Следующий периодический номер CODATA, содержащий значения констант новых единиц SI будет опубликован в 2018 году.

Рабочая группа по фундаментальным константам CODATA благодарит ГКМВ за предоставленную возможность участия в работе по обновлению единиц SI, которые будут применяться в 21-ом столетии. Возможно, это является наиболее важным событием в Международной системе единиц со времени ее официального принятия в 1960 году.

## Литература

- Azuma, Y., P. Barat, G. Bartl, H. Bettin, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, K. Fujii, H. Fujimoto, and e. al., 2015, *Metrologia* 52(2), 360.
- Bartl, G., P. Becker, B. Beckhoff, H. Bettin, E. Beyer, M. Borys, I. Busch, L. Cibik, G. D'Agostino, E. Darlatt, and e. al., 2017, *Metrologia* 54(5), 693.
- CCT, 2017, Recommendation T1 of the 28th CCT meeting, June 2017, [http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary reports/Recommendation-CCT-T1-2017- EN.pdf](http://www.bipm.org/cc/CCT/Allowed/Summary%20reports/Recommendation-CCT-T1-2017-EN.pdf).
- CGPM, 2011, Resolution 1 of the 24th CGPM, <http://www.bipm.org/en/CGPM/db/24/1/>.
- CIPM, 2016, Decision CIPM/105-15 of the 105th CIPM, <http://www.bipm.org/en/committees/cipm/meeting/105.html>.
- CIPM, 2017, Decision CIPM/2017-xx of the 106th CIPM, <http://www.bipm.org/en/committees/cipm/meeting/106.html>.
- Feng, X. J., J. T. Zhang, H. Lin, K. A. Gillis, J. B. Mehl, M. R. Moldover, K. Zhang, and Y. N. Duan, 2017, *Metrologia* 54(5), 748.
- Gaiser, C., B. Fellmuth, N. Haft, A. Kuhn, B. Thiele-Krivoi, T. Zandt, J. Fischer, O. Jusko, and W. Sabuga, 2017, *Metrologia* 54, 280.
- Gavioso, R. M., D. Madonna Ripa, P. P. M. Steur, C. Gaiser, D. Truong, C. Guianvarc'h, P. Tarizzo, F. M. Stuart, and R. Dematteis, 2015, *Metrologia* 52(5), S274.
- Girard, G., 1994, *Metrologia* 31(4), 317.
- Haddad, D., F. Seifert, L. S. Chao, A. Possolo, D. B. Newell, J. R. Pratt, C. J. Williams, and S. Schlamminger, 2017, *Metrologia* 54(5), 633.
- Huang, W. J., G. Audi, M. Wang, F. G. Kondev, S. Naimi, and X. Xu, 2017, *Chin. Phys. C* 41, 030002.
- Kuramoto, N., S. Mizushima, L. Zhang, K. Fujita, Y. Azuma, A. Kurokawa, S. Okubo, H. Inaba, and K. Fujii, 2017, *Metrologia* 54(5), 716.
- Mohr, P. J., D. B. Newell, and B. N. Taylor, 2016a, *Rev. Mod. Phys.* 88, 035009.
- Mohr, P. J., D. B. Newell, and B. N. Taylor, 2016b, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 45, 043102.
- Mohr, P. J., D. B. Newell, B. N. Taylor, and E. Tiesinga, 2017, *Metrologia* 54.
- Mohr, P. J., and B. N. Taylor, 2000, *Rev. Mod. Phys.* 72(2), 351.
- Mohr, P. J., and B. N. Taylor, 2005, *Rev. Mod. Phys.* 77(1), 1.
- Mohr, P. J., B. N. Taylor, and D. B. Newell, 2008a, *Rev. Mod. Phys.* 80(2), 633.
- Mohr, P. J., B. N. Taylor, and D. B. Newell, 2008b, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 37(3), 1187.
- Mohr, P. J., B. N. Taylor, and D. B. Newell, 2012a, *Rev. Mod. Phys.* 84(4), 1527.
- Mohr, P. J., B. N. Taylor, and D. B. Newell, 2012b, *J. Phys. Chem. Ref. Data* 41, 043109.
- Moldover, M. R., J. P. M. Trusler, T. J. Edwards, J. B. Mehl, and R. S. Davis, 1988, *Phys. Rev. Lett.* 60(4), 249.
- Pitre, L., C. Guianvarc'h, F. Sparasci, A. Guillou, D. Truong, Y. Hermier, and M. E. Himbert, 2009, *C. R. Physique* 10(9), 835.
- Pitre, L., L. Risegari, F. Sparasci, M. D. Plimmer, M. E. Himbert, and P. A. Giuliano Albo, 2015, *Metrologia* 52(5), S263.
- Pitre, L., F. Sparasci, L. Risegari, C. Guianvarc'h, C. Martin, M. E. Himbert, M. D. Plimmer, A. Allard, B. Marty, P. A. Giuliano Albo, B. Gao, M. R. Moldover, et al., 2017, *Metrologia* 54, 856.
- Pitre, L., F. Sparasci, D. Truong, A. Guillou, L. Risegari, and M. E. Himbert, 2011, *Int. J. Thermophys.* 32(9), 1825.
- Podesta, M. d., D. F. Mark, R. C. Dymock, R. Underwood, T. Bacquart, G. Sutton, S. Davidson, and G. Machin, 2017, *Metrologia* 54(5), 683.
- Qu, J., S. P. Benz, K. Coakley, H. Rogalla, W. L. Tew, R. White, K. Zhou, and Z. Zhou, 2017, *Metrologia* 54, 549.
- Quinn, T. J., 1991, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 40(2), 81. Schlamminger, S., R. L. Steiner, D. Haddad, D. B. Newell, F. Seifert, L. S. Chao, R. Liu, E. R. Williams, and J. R. Pratt, 2015, *Metrologia* 52(2), L5.
- Sutton, G., R. Underwood, L. Pitre, M. de Podesta, and S. Valkiers, 2010, *Int. J. Thermophys.* 31(7), 1310.
- Thomas, M., D. Ziane, P. Pinot, R. Karcher, A. Imanaliev, F. Pereira Dos Santos, S. Merlet, F. Piquemal, and P. Espel, 2017, *Metrologia* 54(4), 468.
- Wang, M., G. Audi, F. G. Kondev, W. J. Huang, S. Naimi, and X. Xu, 2017, *Chin. Phys. C* 41, 030003.
- Wood, B. M., C. A. Sanchez, R. G. Green, and J. O. Liard, 2017, *Metrologia* 54, 399.