

## О ПРЕДСТОЯЩЕЙ РЕФОРМЕ МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ

# The International System of Units

# SI



Bureau International  
des Poids et Mesures  
(BIPM)



*М.И. Калинин,  
кандидат физико-математических наук,  
ведущий научный сотрудник, ФГУП «ВНИИМС, Москва,  
kalinin@vniims.ru*

В 2018 г. планируется проведение реформы Международной системы единиц (СИ). Определения основных единиц в Новой СИ привязываются к точным значениям ряда так называемых определяющих констант. Одной из задач Международных метрологических организаций и Национальных метрологических институтов является широкое информирование пользователей СИ о готовящейся реформе системы единиц. В данной статье кратко излагаются причины и основные положения предстоящей реформы.

### Предпосылки предстоящей реформы СИ

Международная система единиц, принятая в 1960 г. на XI Генеральной конференции мер и весов (ГКМВ), явилась естественным развитием метрической системы мер. СИ представляет собой когерентную систему, включающую в себя основные величины, их единицы и производные единицы. Размерности основных единиц являются независимыми. Размерности производных

единиц выражаются через размерности основных в виде произведений и частных их целых степеней.

Действующая в настоящее время «Международная система единиц (СИ)» официально изложена на французском и английском языках в документе [1], опубликованном Международным бюро мер и весов (МБМВ) в 2006 г. и называемым обычно «Брошюра СИ» – 8-я редакция. Этот документ доступен на сайте МБМВ. Во второй главе брошюры содержатся опреде-



ления семи основных единиц СИ. Их можно условно разделить на три типа [2]:

а) эталон-артефакт – Международный прототип килограмма (МПК), действующий с 1889 г. и до настоящего времени, определяет единицу массы

«килограмм есть единица массы; он равен массе международного прототипа килограмма»;

б) единицы, определяемые заданием физического состояния или условия. К таким единицам относятся единицы времени, температуры, количества вещества и силы света

*«секунда есть длительность 9192631770 периодов излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия -133»,*

*«кельвин есть единица термодинамической температуры, равная 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды»,*

*«моль есть количество вещества системы, которое содержит столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в 0,012 килограмма углерода - 12»,*

*«кандела – сила света в данном направлении от источника, который испускает монохроматическое излучение с частотой  $540 \times 10^{12}$  Гц, интенсивность излучения которого в этом направлении составляет 1/683 ватт настерадиан»;*

в) единицы, определяемые заданием способа их реализации. К ним относятся единицы длины и силы электрического тока

*«метр есть длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени, равный 1/299792458 секунды»,*

*«ампер есть сила постоянного тока, который при прохождении по двум строго параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 метра один от другого, вызывал бы между этими проводниками на участке проводника длиной 1 метр силу взаимодействия, равную  $2 \times 10^{-7}$  ньютона».*

Наличие артефакта в качестве опреде-

ления единицы массы давно уже беспокоит метрологов и является одной из основных причин предлагаемой реформы СИ. Он не связан с каким-либо природным инвариантом. Он легко может быть уничтожен или испорчен. Кроме того, и это – главное, он не стабилен. Три сличения национальных прототипов килограмма с МПК в период с 1889 г. до 1991 г. выявили расхождение со временем их масс на 50 мкг за 100 лет. И до сих пор нет ясности, массы каких эталонов менялись и в какую сторону. Поэтому возможность переопределения килограмма через стабильную инвариантную величину – массу атома или фундаментальную физическую постоянную – обсуждалась, по меньшей мере, всю последнюю четверть прошлого столетия.

Недостатки определений ампера, моля и канделы в основном вызваны их зависимостью от определения килограмма. Кроме того, новые технологии, основанные на эффекте Джозефсона и квантовом эффекте Холла позволяют воспроизводить электрические единицы, в том числе и ампер, гораздо точнее, чем прямая реализация официального определения, которое существует в нынешней СИ. Это обстоятельство привело к тому, что в 8-й редакции брошюры СИ рекомендовано использовать именно квантовые методы для реализации электрических единиц при сохранении нынешнего определения ампера.

Определение кельвина через точно заданное значение температуры тройной точки воды связано с действительно инвариантным природным состоянием. Однако её температура в значительной степени зависит от содержания примесей и изотопного состава данного объема воды. Это ограничивает точность, с которой данное определение может быть реализовано. Кроме того, возможность существования точного (с нулевой неопределённостью) значения температуры фазового перехода, в том числе и температуры тройной точки воды в последнее время подвергается сомнению [3]. в работе Янга и Ли [4] было показано, что в молекулярной системе конечных размеров все термодинамические функции являются аналитическими и не имеют разрывов даже в области фазовых переходов. Пере-

## МЕЖДУНАРОДНАЯ СИСТЕМА ЕДИНИЦ (СИ)

величина	наименование единицы	обозначение	величина	наименование единицы	обозначение
<b>ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ</b>			<b>ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ</b>		
ДЛИНА	метр	м	ЧАСТОТА	герц	Гц
МАССА	килограмм	кг	СКОРОСТЬ	метр в секунду	$\frac{м}{с}$
ВРЕМЯ	секунда	с	УСКОРЕНИЕ	метр на секунду в квадрате	$\frac{м}{с^2}$
СИЛА ТОКА	ампер	А	ПЛОТНОСТЬ	килограмм на кубический метр	$\frac{кг}{м^3}$
СИЛА СВЕТА	кандела	кд	СИЛА	ньютон	Н $1 Н = 1 кг \cdot \frac{м}{с^2}$
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА	кельвин	К	ИМПУЛЬС	килограмм — метр в секунду	$кг \cdot \frac{м}{с}$
КОЛИЧЕСТВО ВЕЩЕСТВА	моль	моль	ДАВЛЕНИЕ	паскаль	Па $1 Па = 1 \frac{Н}{м^2}$
<b>ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ</b>			РАБОТА, ЭНЕРГИЯ	джоуль	Дж $1 Дж = 1 Н \cdot м$
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД	кулон	Кл $1 Кл = 1 А \cdot с$	МОЩНОСТЬ	ватт	Вт $1 Вт = 1 \frac{Дж}{с}$
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕНИЕ, ЭДС	вольт	В $1 В = 1 \frac{Дж}{Кл}$	МАГНИТНЫЙ ПОТОК	вебер	Вб $1 Вб = 1 Тл \cdot м^2$
НАПРЯЖЕННОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	вольт на метр	$\frac{В}{м}$	ИНДУКТИВНОСТЬ	генри	Гн $1 Гн = 1 \frac{Вб}{А}$
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ	ом	Ом $1 Ом = 1 \frac{В}{А}$	МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ	тесла	Тл $1 Тл = 1 \frac{Н}{А \cdot м}$
ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ	фарад	Ф $1 Ф = 1 \frac{Кл}{В}$			

ход от одной фазы к другой при изменении температуры происходит формально непрерывно, без скачка, но в очень узкой температурной области, которая воспринимается современными, даже самыми чувствительными термометрами, как одна точка – точка разрыва. Но принципиально размер этой переходной области не равен нулю, и он определяет неустранимое значение неопределённости температуры фазового перехода. Эта неопределённость не связана с измерением температуры фазового перехода, а является неопределённостью самого понятия температуры фазового перехода. И температура основной реперной точки – тройной точки воды, определяющая значение единицы термодинамической температуры, также имеет ненулевую неопределённость.

Более подробно с проблемами определения основных единиц СИ и их реализации, которые привели к необходимости реформы СИ, можно ознакомиться в работе [5].

Как указывалось выше, главной проблемой на пути улучшения СИ является определение килограмма. Поэтому возможность переопределения килограмма через истинный природный инвариант – массу атома

или фундаментальную физическую постоянную – обсуждалась, по меньшей мере, всю последнюю четверть прошлого столетия. Необходимость замены нынешнего определения килограмма на основе артефакта другим, основанным на инварианте, была признана XXI ГКМВ в Резолюции 7 в 1999 г. В ней была рекомендация, чтобы «национальные лаборатории продолжали работу, направленную на улучшение экспериментов по привязке единицы массы к фундаментальным или атомным константам, с целью будущего переопределения килограмма» [6].

Обсуждение возможного переопределения килограмма состоялось на 93-м заседании МКМВ в октябре 2004 г. А на 94-м заседании в октябре 2005 г. МКМВ принял рекомендацию о подготовительных мерах по переопределению килограмма, ампера, кельвина и моля таким образом, чтобы эти единицы были привязаны к точно известным значениям фундаментальных констант. С этого момента активизировались экспериментальные и теоретические работы по подготовке реформы СИ во всём мире.



### Подготовительные работы к реформе СИ

Основными требованиями к системе единиц являются необходимая точность и стабильность определений основных единиц и методов их реализации, их инвариантность, то есть независимость от времени и места реализации единицы. Эти требования вытекают из постоянно возрастающих потребностей науки, производства, торговли. История развития метрической системы мер, а затем и СИ показала, что единицы, связанные с объектами макромира, быстро перестают удовлетворять этим требованиям.

Объекты, пригодные для определения стабильных единиц с высокой точностью и инвариантных относительно пространственных и временных трансляций, учёные берут сейчас из микромира. Этот путь указал ещё Дж. К. Максвелл. В своей президентской речи перед Британской ассоциацией продвижения науки он говорил [7, стр. 15]: «Если мы хотим получить эталоны длины, времени и массы, которые будут абсолютно неизменными, мы должны искать их не в размерах, или движении, или массе нашей планеты, но в длине волны, периоде колебаний, абсолютной массе устойчивых, неизменных и совершенно одинаковых молекул». И развитие системы единиц действительно пошло по этому пути.

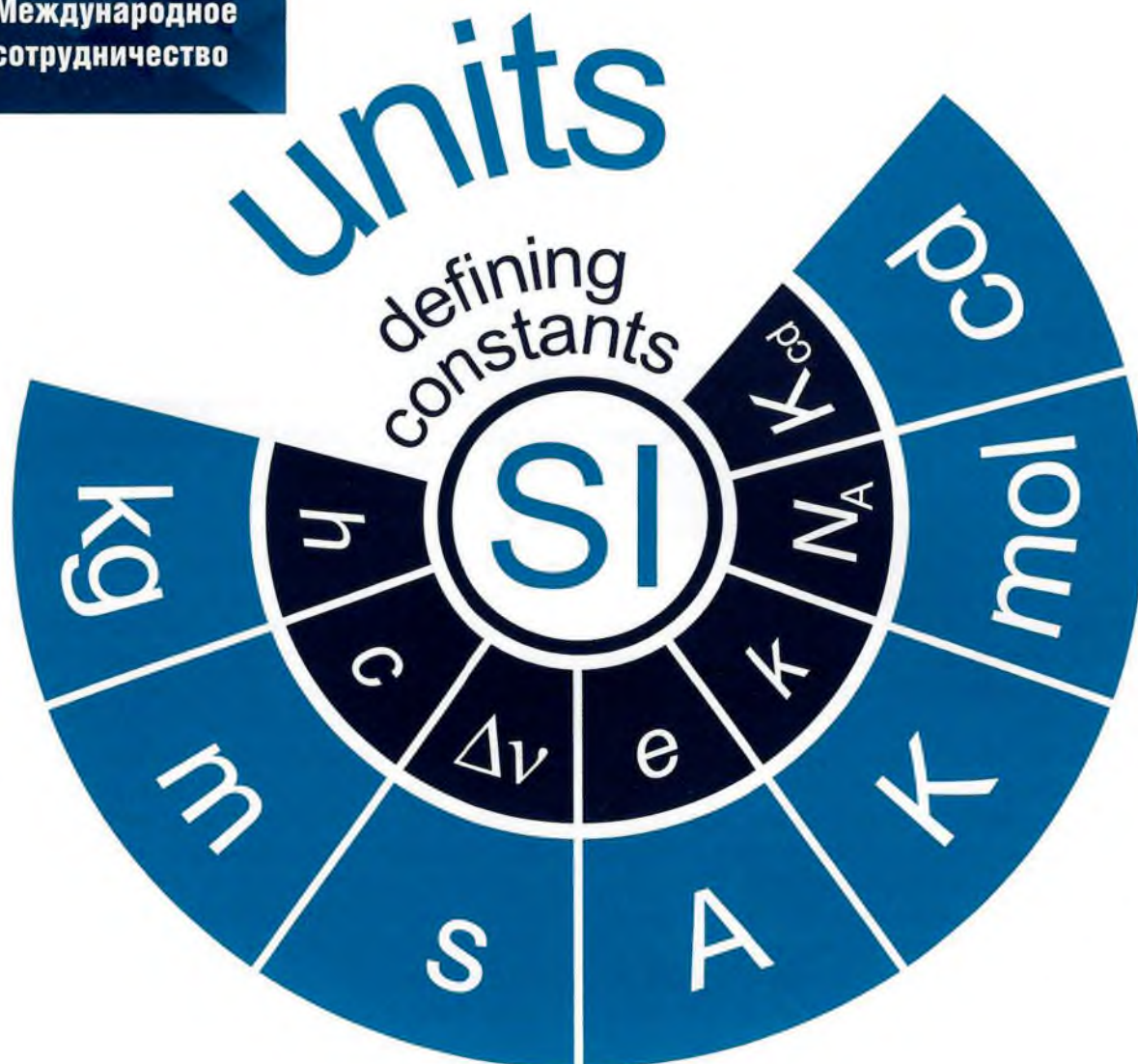
Ядром реформы СИ является переопределение четырёх основных единиц: килограмма, ампера, кельвина и моля на основе фиксации значений четырёх фундаментальных физических констант с нулевой неопределённостью, и применение этого единого принципа к определению всех семи основных единиц СИ, в отличие от трёх различных типов определений в действующей СИ. Каждая основная единица Новой СИ будет связана с некоторой определяющей константой, значение которой будет зафиксировано с нулевой неопределённостью.

Такая процедура уже была успешно опробована в 1983 г., когда зафиксировали с нулевой неопределённостью значение

скорости света в вакууме, и определение метра связали с этой величиной вместо прежнего значения метра, связанного с длиной волны оранжевой линии криптона-86. Переход к новому определению метра, конечно, мог изменить величину метра, но только в пределах той погрешности, с которой было измерено в то время наиболее точное значение скорости света. Поэтому все результаты пространственно-временных измерений оставались неизменными в пределах этой погрешности. Точность же последующих измерений длины становилась равной точности измерений времени, которая в начале восьмидесятых годов прошлого века была на полтора-два порядка выше точности измерений длины.

Ещё одним следствием нового определения метра в 1983 г. стало прекращение всех программ измерения скорости света в вакууме, поскольку его значение стало известным точно по определению.

В работе по подготовке реформы СИ, начатой в 2005 г., первой задачей, требующей скорейшего решения, был выбор оптимальной совокупности определяющих констант. Поскольку секунда и метр уже были определены фиксацией точных значений частоты перехода цезия-133 и скорости света в вакууме, а единица силы света также была определена фиксацией точного значения световой эффективности монохроматического излучения, которая является технической константой – коэффициентом пересчёта от энергетических величин к оптическим, то задача состояла в выборе четырёх констант для переопределения килограмма, ампера, кельвина и моля. Выбор трёх констант представлялся почти очевидным: постоянная Больцмана  $k$  связывается с единицей термодинамической температуры, постоянная Авогадро  $N_A$  связывается с единицей количества вещества, элементарный электрический заряд  $e$  связывается с единицей силы тока. Хотя относительно постоянной Больцмана были некоторые возражения и споры, но открытое и интенсивное обсуждение в научном сообществе позволило быстро прийти к консенсусу в этом вопросе. Теоретические исследова-



ния методов выбора совокупности определяющих констант проводились и в России [8-11].

А вот выбор определяющей константы для единицы массы был непростым. И хотя авторы идеи переопределений четырёх основных единиц СИ [4] предлагали фиксировать постоянную Планка  $h$  с реализацией килограмма с помощью ватт-весов, развернулись ожесточённые дискуссии. Было написано множество статей за и против разных вариантов. В основном обсуждались два возможных варианта реализации метра и соответственно две константы, предлагаемые для фиксации. Первый метод – упоминавшиеся уже ватт-весы, использующие фиксированное значение постоянной Планка. Этот метод развивался в национальных метрологических институтах США, Канады, Франции, Испании, Швейцарии. Второй метод – проект Авогадро, связан с фиксацией с нулевой неопределённостью значения атомной единицы

массы  $u$ . Его развивали в метрологических институтах Германии, Японии.

В результате длительных обсуждений был выбран набор следующих четырёх фундаментальных констант в качестве определяющих единицы массы – постоянная Планка, силы тока – элементарный электрический заряд, термодинамической температуры – постоянная Больцмана и количества вещества – постоянная Авогадро. Следующая задача, которая на практике решалась параллельно с выбором совокупности определяющих констант, была задача измерения указанных фундаментальных констант, которые будут в дальнейшем зафиксированы как точные, с наивысшей точностью, недоступной в 2005 г. Величины относительных стандартных неопределённостей  $u_r$ , с которыми требовалось измерить значения констант, должны удовлетворять условиям:

- для постоянной Планка  $u_r(h) \leq 2 \times 10^{-8}$ ,



- для элементарного заряда  
 $u_r(e) \leq 1 \times 10^{-8}$ ,
- для постоянной Больцмана  
 $u_r(k) \leq 1 \times 10^{-6}$ ,
- для постоянной Авогадро  
 $u_r(N_A) \leq 2 \times 10^{-8}$ .

На сайте МБМВ с 2010 г. регулярно публиковался для широкого обсуждения проект второй главы новой (9-й) редакции брошюры СИ, посвящённый определению единиц СИ. Последний к настоящему времени вариант (уже 4-й) опубликован 10 ноября 2016 г. [12].

Первоначально было определено, что реформа СИ будет осуществлена в 2011 г., поскольку предполагалось, что до 2010 г. удастся измерить значения констант с заданной точностью. Однако эта задача оказалась непростой. И дата осуществления реформы дважды отодвигалась. И только в 2014-2016 гг. произошло серьёзное повышение точности измерений указанных констант. Сразу несколько различных групп, пользуясь различными методами, измерили значения указанных констант с необходимой точностью.

И в 2017 г. Комитет по численным данным для науки и техники (CODATA – Committee On Data for Science & Technology), обработав массив всех экспериментальных данных, подготовил и опубликовал согласованные значения этих констант, которые удовлетворяют сформулированным для них условиям, и которые могут уже использоваться для новых определений четырёх указанных единиц СИ. Значения этих констант и их относительные стандартные неопределённости, подготовленные КОДАТА, следующие:

$$h = 6,626\,070\,147(67) \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

$$u_r(h) = 1,0 \times 10^{-8};$$

$$e = 1,602\,176\,6338(81) \times 10^{-19} \text{ Кл},$$

$$u_r(e) = 5,1 \times 10^{-9};$$

$$k = 1,380\,649\,01(51) \times 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1},$$

$$u_r(k) = 3,7 \times 10^{-7};$$

$$N_A = 6,022\,140\,761(61) \times 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

$$u_r(N_A) = 1,0 \times 10^{-8}.$$

Эти результаты дают основание полагать, что в 2018 г. на XXVI ГКМВ будет осуществлена реформа СИ.

## Основные отличия Новой СИ от ныне действующей

1. Общая структура СИ сохраняется, сохраняются все основные величины и их единицы. Это важно для минимизации возможных изменений в будущей системе измерений, так как эти величины и единицы отвечают современным и вероятно – будущим потребностям большинства пользователей системы единиц. Однако, во второй главе 9-й редакции брошюры СИ появляется дополнительный пункт под названием «Определение СИ», которое сформулировано следующим образом (здесь и далее используются те значения определяющих констант, которые представлены в последнем проекте брошюры СИ).

Международная система единиц, СИ, есть система единиц, в которой

- частота перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133

$$\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770 \text{ Гц},$$

- скорость света в вакууме

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ м/с},$$

- постоянная Планка

$$h = 6,626\,070\,040 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с},$$

- элементарный заряд

$$e = 1,602\,176\,620\,8 \times 10^{-19} \text{ Кл},$$

- постоянная Больцмана

$$k = 1,380\,648\,52 \times 10^{-23} \text{ Дж/К},$$

- постоянная Авогадро

$$N_A = 6,022\,140\,857 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1},$$

- световая эффективность монохроматического излучения частоты  $540 \times 10^{12}$  Гц  
 $K_{\text{cd}} = 683 \text{ лм/Вт}$ .

Численные значения семи определяющих констант не имеют неопределённости.

В отличие от указанных выше трёх типов единиц в действующей сейчас СИ, в Новой СИ определения всех семи основных единиц задаются единообразно, связывая их

с точными значениями выбранных констант:

«секунда, символ  $s$ , есть единица времени в СИ. Она определяется заданием фиксированного численного значения частоты  $\Delta\nu_{Cs}$  перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133, равного 9 192 631 770, в единице Гц, равной  $s^{-1}$ »;

«метр, символ  $m$ , есть единица длины в СИ. Он определяется заданием фиксированного численного значения скорости света в вакууме  $c$ , равного 299 792 458 в единице  $m \cdot s^{-1}$ , где секунда определяется через частоту  $\Delta\nu_{Cs}$ »;

«килограмм, символ  $kg$ , есть единица массы в СИ. Он определяется заданием фиксированного численного значения постоянной Планка  $h$ , равного  $6,626\ 070\ 040 \times 10^{-34}$  в единице Дж·с, которая равна  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ , где  $m$  и  $s$  определяются через  $c$  и  $\Delta\nu_{Cs}$ »;

«ампер, символ  $A$ , есть единица электрического тока в СИ. Он определяется заданием численного значения элементарного заряда  $e$ , равного  $1,602\ 176\ 620\ 8 \times 10^{-19}$  в единице Кл, равной  $A \cdot s$ , где секунда определяется через частоту  $\Delta\nu_{Cs}$ »;

«кельвин, символ  $K$ , есть единица термодинамической температуры в СИ. Он определяется заданием численного значения постоянной Больцмана  $k$ , равного  $1,380\ 648\ 52 \times 10^{-23}$  в единице Дж/К, которая равна  $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ , где килограмм, метр и секунда определяются через  $h$ ,  $c$ , и  $\Delta\nu_{Cs}$ »;

«моль, символ  $mol$ , есть единица количества вещества определённой элементарной составляющей, которой могут быть атомы, молекула, ион, электрон, любая другая частица или определённая группа таких частиц. Он определяется заданием численного значения постоянной Авогадро  $N_A$ , равного  $6,022\ 140\ 857 \times 10^{23}$  в единице  $mol^{-1}$ »;

«кандела, символ  $cd$ , есть единица силы света в данном направлении в СИ. Она определяется заданием численного значения световой эффективности

монохроматического излучения частоты  $540 \times 10^{12}$  Гц,  $K_{cd}$ , равного 683, в единице  $lm \cdot Wt^{-1}$ , которая равна  $cd \cdot sr \cdot Wt^{-1}$  или  $cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^2 \cdot s^3$ , где килограмм, метр и секунда определяются через  $h$ ,  $c$ , и  $\Delta\nu_{Cs}$ ».

Предполагается, что в Новой СИ не будут задаваться конкретные методы реализации основных единиц. Можно будет использовать любые методы, обеспечивающие необходимую точность и прослеживаемость к соответствующей константе. Те современные установки, которые использовались для измерений определяющих констант, станут основой реализации и передачи соответствующих единиц.

В России, к сожалению, не проводились измерения определяющих констант, не разрабатывались и не строились соответствующие экспериментальные установки. И накануне предстоящей реформы СИ у нас в стране нет средств высшей точности для воспроизведения и передачи основных единиц СИ.

## Литература

1. The International System of Units (SI). SI Brochure – 8th ed. – BIPM, 2006. <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/>
2. Pavese F. arXiv 1601.00857v1.
3. Калинин М.И. // Измерительная техника. 2010. № 11. С. 9.
4. Yang C.N., Lee T.D. // Physical Review, 1952. V. 87. № 3. P. 404.
5. Mills I.M. et al. // Metrologia. 2006. V. 43 P. 227.
6. Quinn T.J. Metrologia. // 2000. V. 37. P. 87.
7. Максвелл Дж.К. Статьи и речи. - М.: Наука, 1968.
8. Калинин М.И. // Измерительная техника. 2005. № 7. С. 5.
9. Кононогов С.А. и др. // Измерительная техника. 2005. № 8. С. 3.
10. Хрущёв В.В. // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 3.
11. Бронников К.А. и др. // Измерительная техника. 2015. № 2. С. 11.
12. Draft of the ninth SI Brochure, 10 November, 2016. <http://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/#communication> ■