

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

НОВЫЕ ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ
МЕТРА ДЛИНОЙ СВЕТОВОЙ ВОЛНЫ**

М. Ф. Романова

В течение последних двух лет вопрос о переходе на новое определение метра дважды рассматривался на Международных метрологических совещаниях.

Известно, что в настоящее время единица длины — метр — определяется расстоянием (при определённых условиях) между двумя штрихами, нанесёнными на поверхности платино-иридиевого стержня, хранящегося в Международном бюро мер и весов и являющегося прототипом метра. Уже с 1927 г. перед Генеральной конференцией по мерам и весам был поставлен вопрос о целесообразности определения метра длиной световой волны. Такой переход сделал бы метр неизменным во времени и обеспечил бы увеличение точности измерения длины.

В 1953 г. вопрос о переходе обсуждался на вновь созданном Консультативном комитете по определению метра. Консультативный комитет выработал ряд предложений для Международного комитета мер и весов.

В первом из этих предложений было указано, что «пришло время рассмотреть положительно вопрос о переходе на определение метра, основанное на длине волны светового излучения, для того, чтобы придать основной единице длины одновременно более высокую точность и бесспорный характер всеобщности и неизменности»¹.

В следующих предложениях определялся порядок перехода на новое определение метра и были даны общие положения об условиях воспроизведения длины волны, определяющей метр. Было указано, что сейчас ещё нельзя сделать окончательный выбор нового эталона длин световых волн и необходимо продолжение научных исследований в этом направлении. Наконец, в последнем

предложении рекомендуется Международному комитету просить 10-ю Генеральную конференцию по мерам и весам после принципиального решения вопроса предоставить Международному комитету право окончательно установить порядок и дату перехода на новое определение метра, не дожидаясь следующей Генеральной конференции.

Итак, вопрос о переходе на новое определение метра при рассмотрении на совещании специалистов в принципе был решён положительно.

10-я Генеральная конференция мер и весов собралась осенью 1954 г. На её заседаниях были заслушаны предложения Консультативного комитета, но по вопросу о метре было принято другое решение.

В этом решении предлагается крупным метрологическим лабораториям продолжать свои работы по изучению монохроматических излучений с целью дать возможность 11-й Генеральной конференции принять окончательное решение и в то же время подчёркивается, что решено пока не изменять определение метра.

Таким образом, 10-я Генеральная конференция, на которой были представлены специалисты не только по измерению длины, но и по другим областям метрологии, не согласилась с последним предложением Консультативного комитета.

Широких прений по этому вопросу на конференции не было, так же как и на Консультативном комитете. С научно обоснованными возражениями против перехода на новое определение метра можно ознакомиться в статьях, написанных по этому поводу французскими метрологами: Пераром^{2,3}, Воле⁴ и Террьеном⁵.

Достаточно полное изложение затронутого вопроса дано в статье Леннойз: «Эталоны длины. Заменит ли световое излучение в скором времени метр-эталон»⁶, реферированной в настоящем журнале под сокращённым названием⁷.

Основные возражения против перехода на метр, определяемый длиной световой волны сводятся к следующим двум:

1. Для того чтобы длина световой волны могла быть воспроизведена с высокой точностью, необходимо соблюдение ряда требований в отношении условий излучения света.

Необходимость выполнения этих условий как бы лишает длину световой волны её «естественного» характера.

2. Переход на определение метра длиной световой волны не повлечёт за собой увеличения точности измерения длины.

Остановимся на первом, наиболее существенном возражении. Действительно, контур спектральной линии зависит от ряда причин: естественной ширины линии, теплового расширения, расширения под действием внешних электрических и магнитных полей, расширения, зависящего от давления газа или пара внутри источника света, явления самообращения, наличия сверхтонкой структуры⁸.

Эти причины могут придать контуру линии сложный асимметричный характер. При изменении контура линии в зависимости от условий излучения может изменяться положение максимума, определяющего эффективную длину волны спектральной линии. Кроме того, эффективная длина волны спектральной линии, имеющей не вполне разрешённую сверхтонкую структуру, даже и при устойчивом контуре, изменяется при изменении разности хода в интерферометре⁹.

Несомненно, что условия излучения должны быть в том или ином виде стандартизованы. Несходимость спецификации на воспроизведение основной длины световой волны (эталона длин волн) делается совершенно понятной, если вспомнить, что эта длина волны должна воспроизводиться с точностью до 0,0001 или даже 0,00005 Å, т. е. погрешность её воспроизведения должна быть примерно в 10 000 раз меньше размеров излучающего атома. Невозможно, чтобы достижение такой высокой точности не требовало соблюдения ряда предосторожностей, что не лишает, по нашему мнению, световую волну её «естественного» характера и не мешает считать её неизменной со временем.

Так как причины, могущие расширить контур линии или сделать его асимметричным, многочисленны и разнообразны, целесообразно отказаться от стандартизации источника излучения: его размеров, плотности тока, напряжения, давления паров и газов внутри источника света, подобно тому как это имеет место сейчас при воспроизведении красной линии кадмия в стандартной лампе Майкельсона¹⁰.

Гораздо более правильно предъявить требования к самой излучаемой спектральной линии, которые позволяли бы сделать заключение, что асимметрия контура и связанное с ней смещение максимума малы и не могут оказывать заметного влияния на значение длины волны этой линии^{11, 12}.

Не забывая о необходимости установления ряда условий при воспроизведении спектральной линии, не следует преувеличивать трудности их соблюдения. Многочисленные исследования воспроизводимости длины волны красной линии кадмия как в стандартной лампе Майкельсона, так и в других источниках света показали, что эта длина волны может быть воспроизведена с погрешностью, не превышающей $0,0001 \div 0,0002$ Å.

Задача рационального выбора основной длины световой волны сводится на основании изложенного к выбору такой спектральной линии, которая позволила бы с наименьшими трудностями добиться соблюдения установленной спецификации. Это означает, что уровни энергии, определяющие данную линию, должны быть наименее подвержены влиянию условий излучения. Коротко требования к основной спектральной линии могут быть сведены к одному: длина волны основной спектральной линии должна обладать наивысшей воспроизводимостью.

Остановимся на втором возражении против перехода на новое определение метра. Указывается, что такой переход не приведёт к повышению точности измерения длины по сравнению с существующим положением, когда длина метра определяется платиниридиевым прототипом метра.

Точность измерения длины как штриховых, так и концевых мер определяется не только измерительными приборами и методами, но и совершенством изготовления самих мер: макро- и микрогеометрией и взаимной параллельностью поверхностей, ограничивающих концевую меру, шириной и качеством штрихов, нанесённых на штриховой мере. В настоящее время штрихи на прототипе метра и эталонах метра широки (около $8\text{ }\mu$) и недостаточно совершенны. С такими штрихами при сравнении длин двух эталонов метра только в результате 8—10 измерений можно довести среднюю квадратичную погрешность результата измерения до $\pm 0,1\text{ }\mu$. Такая же погрешность будет сопровождать определение длины рабочего эталона дециметра.

Наш опыт показывает, что при 10-кратных измерениях длины 100-миллиметровой концевой меры путём сравнения её с длиной световой волны интерференционным методом без труда погрешность может быть доведена до $0,005\text{ }\mu$, т. е. концевая мера может быть измерена в 200 раз более точно, чем штриховая мера. При переходе к большей длине, в частности к метровой концевой мере, применяется метод умножения¹³. В этом случае относительная погрешность остаётся постоянной и равняется относительной погрешности определения исходной длины. Основываясь на красной линии естественного кадмия, целесообразно взять исходную длину равной 100 мм , что даёт погрешность порядка $0,05\text{ }\mu$ при измерении длины метровой концевой меры.

При переходе на новое определение метра будет необходимо измерять штриховые эталоны метра в длинах световых волн. В настоящее время для этой цели применяется метод боковичков, сводящийся к превращению концевой меры, предварительно измеренной в длинах световых волн, в штриховую.

Нередко преувеличивают погрешность, сопровождающую этот переход, т. е. погрешность определения расстояния между штрихами, на двух боковичках, притёртых к поверхностям концевой меры. Наш опыт показывает, что погрешность определения длины эталона метра этим методом достигает величины $\pm 0,1\text{ }\mu$, т. е. имеет тот же порядок, как и погрешность, получающаяся при сравнении этого эталона с государственным эталоном метра¹⁴.

В дальнейшем возможно применять и другие, более совершенные методы сравнения длины штриховой меры с длиной световой волны¹⁵. Для осуществления одного из таких методов М. Б. Бржезинским во ВНИИМ создан в настоящее время универсальный интерференционный компаратор, позволяющий более пря-

мым методом сравнивать длину штриховой меры с длиной световой волны.

Итак, при переходе на новое определение метра без труда может быть получена при измерении метровых штриховых мер точность, получаемая в настоящее время, когда единица длины определяется длиной прототипа метра.

Что касается дальнейшего повышения точности, то для этого прежде всего необходимы меры с более совершенными штрихами по сравнению со штрихами на прототипе и национальных эталонах метра.

Если переход на новое определение метра и не увеличит во всех случаях точность измерения длины, то он увеличит достоверность этих измерений, так как длина любой меры может быть в случае надобности сравнена «со световым метром», что полностью исключено в настоящее время, когда единица длины определяется длиной прототипа метра.

Высказывая приведённые выше довольно существенные возражения, ни один из авторов не считает, что переход на определение метра световой волны, т. е. переход на «световой метр», принципиально нецелесообразен.

Некоторые метрологи как в СССР, так и за границей считают, что современный прототип метра (метр-эталон) вполне обеспечивает запросы современной практики и, следовательно, можно «подождать» с переходом на новое определение метра ещё в течение большого промежутка времени. Так, например, П. М. Тиходеев пишет: «заканчивая обзор состояния дела с единицей длины, полезно подчеркнуть, что в общем она в состоянии обеспечить высокие запросы практики в смысле точности и неизменности ещё долгие годы»¹⁶.

Эта точка зрения не разделяется специалистами в области измерения длины, в частности она не разделяется и метрологами Международного бюро мер и весов, где хранится прототип метра. А Перар, возражая против поспешного перехода на новое определение метра, всё же полагает, что измерение длины концевых мер не может быть полностью обеспечено штриховым прототипом метра. Поэтому измерения длины должны основываться на двух эталонах — штриховом и световом. Задача единства измерений сводится к установлению точного соотношения между этими двумя эталонами.

Директор Международного бюро Ш. Воле считает, что в настоящем виде метр-прототип не обеспечивает необходимую точность даже и в отношении штриховых мер. Положение, когда два эталона метра при нанесении на них новых более совершенных штрихов будут сравниваться между собой с большей точностью, чем каждый из них с метром-прототипом, нельзя считать нормальным. Воле считает поэтому необходимым в ближайшее время нанести новые значительно более совершенные штрихи на национальных эталонах и эталонах-копиях, сравнить эти эталоны метра между

собой и один раз, насколько возможно точно, с прототипом метра и приписать каждому из этих эталонов его значение. Эта совокупность метров образует в дальнейшем групповой эталон, определяющий единицу длины.

В дальнейшем метр-прототип не будет больше применяться при международных сличениях³.

Таким образом, по мнению Воле, переход на новое определение метра неизбежен, но возможно не связывать новое определение метра с длиной световой волны.

Нам кажется, что возражения против перехода на «световой метр» возникают главным образом потому, что методы поддержания единства измерений после этого перехода должны существенно измениться. Вместо хранения прототипа метра и периодических сличений с ним национальных эталонов метра Международному бюро придётся взять на себя организацию сравнения результатов измерений в различных странах концевых, а затем и штриховых мер в световых волнах. К таким сличениям Международное бюро мер и весов приступило только в 1952—1953 гг. В настоящее время обработка результатов сравнения ещё не закончена.

Эти новые методы более привычны метрологам нашей страны. В СССР установлена система обязательных государственных поверок длины стальных плоскопараллельных концевых мер. Эталоном длины при этих измерениях является длина световой волны¹⁷. Непосредственные измерения длины концевых мер в световых волнах, или «поверка плоскопараллельных концевых мер 1-го разряда абсолютным интерференционным методом», производятся в лабораториях Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (Ленинград), его Свердловского филиала, трёх Государственных институтов мер и измерительных приборов (Москва, Харьков, Новосибирск) и в Ленинградском Управлении мер и измерительных приборов.

С целью поддержания единства измерений в отношении концевых мер (до 100 мм) перечисленные лаборатории ежегодно измеряют по четыре меры (5, 20, 50 и 100 мм) и направляют их во ВНИИМ. Здесь меры поверяются вторично. Величина расхождения между измерениями в одной из перечисленных лабораторий и во ВНИИМ дает оценку пригодности интерференционной установки и всех условий измерения для обеспечения требуемой точности измерения. Такие ежегодные сравнения были начаты ещё в 1939 г. и возобновлены в 1945 г.

Анализируя результаты этих сравнений, можно видеть, как постепенно лаборатории совершенствуют свои установки и повышают точность измерения. Если ранее допустимое расхождение при этих измерениях для меры в 100 мм было установлено равным 0,1 мк, то в последние годы допустимое расхождение было снижено до 0,07 мк. Наибольшая точность была достигнута при сравнениях

результатов измерения между лабораториями ХГИМИП и ВНИИМ в 1954 г.; расхождение между результатами измерения всех четырёх мер не превышало 0,01 μ .

Приведённые данные опровергают положение, высказанное Ленной⁶ в цитированной ранее статье, который говорит, что воспроизведение эталона в виде световой волны представляет собой трудную задачу, недоступную для рядовой лаборатории.

Сохранение определения метра длиной метра-прототипа неизбежно ведёт к двойственности в определении единицы длины, которая стала особенно заметной после того, как были освоены интерференционные измерения и красная линия кадмия стала применяться как эталон не только в спектроскопии при измерении длин волн, но и в практике при различных точных измерениях длин.

В нашей стране были разработаны интерференционные методы и созданы интерферометры для измерения концевых мер до 1 метра и до 1,2 метра. Государственный эталон метра посредством метровой концевой меры периодически сравнивается с длиной волны красной линии естественного кадмия. Государственный эталон метра СССР можно считать поэтому воспроизводимым эталоном. Такое положение соответствует фактическому переходу на световой метр¹³.

Двойственное определение метра не вызывает больших затруднений на практике до тех пор, пока прототип метра сохраняет свою длину. Как только появится расхождение между длиной «светового метра», определяемой установленным значением красной линии кадмия, и длиной прототипа метра, переход на световой метр станет неизбежным. В противном случае пришлось бы считать без достаточных оснований, что длины волн всех спектральных линий изменили своё значение.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. Verb. C. I., Pds. et Mes. (tirage à part), XXIV, M—22 (1954)
2. A. Pérard, Comptes rendus **237**, 284—287 (1953).
3. A. Pérard, Comptes rendus **237**, 364—367 (1953).
4. Ch. Volet, Proc. Verb. C. I. Pds et Mes., XXIV, M—12 (1954),
5. J. Terrien, La Revue Française de l'Élite Europ., **41**, 21—24 (1952).
6. Robert Lennuier, Astronomie **67**, 357 (1953).
7. Н. Малов, УФН **53**, 3, 433 (1954).
8. A. Pérard, La créature du Bureau international des Poids et Mesures et son oeuvre, Gautier-Villard, 259—292 (1927).
9. A. Pérard, Rev. d'Optique **7**, 1 (1928).
10. Comptes rendus des séances de la septième conférence générale Pds. et Mes. en 1927, **40**, 53 (1927).
11. То же в 1948 г., 85 (1949).
12. См. 1, M—87 (1954).

13. М. Ф. Романова, УФН, XLVII, 2, 161 (1952).
14. М. Ф. Романова, Е. А. Волкова, Л. К. Каяк, Труды ВНИИМ, вып. 16 (76), 4 (1951).
15. J. Terrien, Comptes rendus 238, 1001 (1954).
16. П. М. Тиходеев, Очерки об исходных измерениях, Машгиз, 51, 1954.
17. ОСТ 85000 — 39 — Меры длины концевые плоскопараллельные.