



УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ ДЛЯ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ

Г.Ю. Народницкий, доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор научного центра ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

Е.Ф. Сухомлинов, ведущий инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

С.Ю. Тюпа, младший научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков



Г.Ю. Народницкий



Е.Ф. Сухомлинов



С.Ю. Тюпа

Приведены метрологические и технические характеристики государственного первичного эталона единицы длины для уровня жидкости после его усовершенствования.

The metrological and technical characteristics of the national primary standard of length of liquid level units after its modernization are represented.

Государственный первичный эталон единицы длины для уровня жидкости (далее по тексту — эталон) ДЕГУ 03–02–97 был создан в 1997 г. для проведения исследований, метрологической аттестации и поверки эталонных и высокоточных рабочих уровнемеров. Метрологические характеристики эталона в 1997 г. были следующие:

| | |
|--|--------|
| Диапазон значений уровня, м | 0...20 |
| Среднее квадратичное отклонение результата измерений, мм, не более | 0,3 |
| Неисключенная систематическая погрешность, мм, не более | 0,5 |

Эталон базировался на эталонном интерферометрическом уровнемере и двух стальных вертикальных сообщающихся цилиндрических резервуарах с водой длиной около 21 м и диаметрами около 0,7 м (для расположения поверяемого уровнемера) и около 0,15 м (для расположения интерферометрического уровнемера). В связи с не-

возможностью получать стабильные отраженные от поверхности воды оптические сигналы из-за присутствия практически всегда на поверхности воды небольших волн, на поверхности воды располагался поплавков с оптическим отражателем. Поплавков перемещался при изменении уровня воды по трем направляющим струнам, протянутым от дна резервуара до измерительной платформы на верхнем торце меньшей трубы.

В интерферометре был применен гелий-неоновый лазер ЛГ 102 в одночастотном режиме с мощностью излучения на длине волны 0,63 мкм около 1 мВт по фазовой схеме измерения [1]. Налив и слив воды проводились с помощью насосов с вентилями в подвальном этаже здания с применением базового резервуара воды. Таким путем удавалось выставлять необходимый уровень воды с точностью от 3 до 5 см.

За последующие после ввода в эксплуатацию эталона десять лет повысилась точность уровнемеров, большое количество их типов имеет пределы допускаемой погрешности от $\pm 0,5$ до ± 1 мм и метрологические характеристики эталона не всегда позволяли проводить метрологическую аттестацию и поверку таких точных уровнемеров. В связи с этим в период с 2008 по 2014 гг. было проведено усовершенствование эталона. Целью усовершенствования было повышение точности эталона и производительности работ на нем.

На первом этапе работ по усовершенствованию были проанализированы основные пути повышения производительности и точности эталона. Для повышения производительности была запланирована замена обычных вентиля шаровыми клапанами с дистанционным управлением и изготовление пульта управления ими. Такая система могла дистанционно обеспечить, без присутствия операторов в подвальной части здания, подъем и опускание уровня воды с дискретностью менее 1 мм.

В связи с разными диаметрами резервуаров, в которых размещаются поверяемый уровнемер и интерферометр, нагрев и охлаждение воды в них проходят с разной скоростью и отличие температуры воды может составлять до 1 °С, а соответствующая разница уровней воды в резервуарах для уравнивания воды при полностью наполненных резервуарах может достигать 4 мм (рис. 1). Измерить и учесть эту разницу средних температур воды в резервуарах точнее 0,1 °С невозможно, что приводит к составляющей погрешности эталона около 0,4 мм. По этой причине было принято решение о размещении поверяемого уровнемера и интерферометра в одном резервуаре диаметром 0,7 м.

В ходе усовершенствования эталона лазер ЛГ 102 был заменен на более мощный лазер ЛГ 103 (около 2,5 мВт), поставлены более толстые струны на поплавки, установлены дистанционные клапаны, изготовлен пульт управления клапанами. Была

оптимизирована ширина лазерного луча, при которой достигается устойчивая работа интерферометра.

Уже при первоначальной разработке эталона для измерения абсолютных расстояний от платформы для размещения поверяемого уровнемера до поверхности воды (интерферометр позволяет измерять только приращение расстояний) было применено специальное сливное отверстие в стенке резервуара для фиксации с высокой точностью начального расстояния от платформы для установки поверяемого уровнемера до поверхности воды на начальном уровне (схема измерений показана на рис. 2). Это отверстие в стенке резервуара соединено трубкой с поверхностью воды. На конце трубки имеется специальный фланец. Образующийся мениск воды на трубке дает отличие уровня конца трубки и уровня воды. Этот мениск в процессе усовершенствования был минимизирован применением наиболее подходящего материала — керамики. Расстояние по вертикали между поверхностью воды на начальном уровне и верхней плоскостью платформы для установки поверяемого уровнемера было измерено с помощью концевой меры длины и штангенглубиномером [2, 3] с соответствующей составляющей погрешности $\Delta_{L_{\text{пов нач}}} = \pm 0,09$ мм и периодически контролируется.

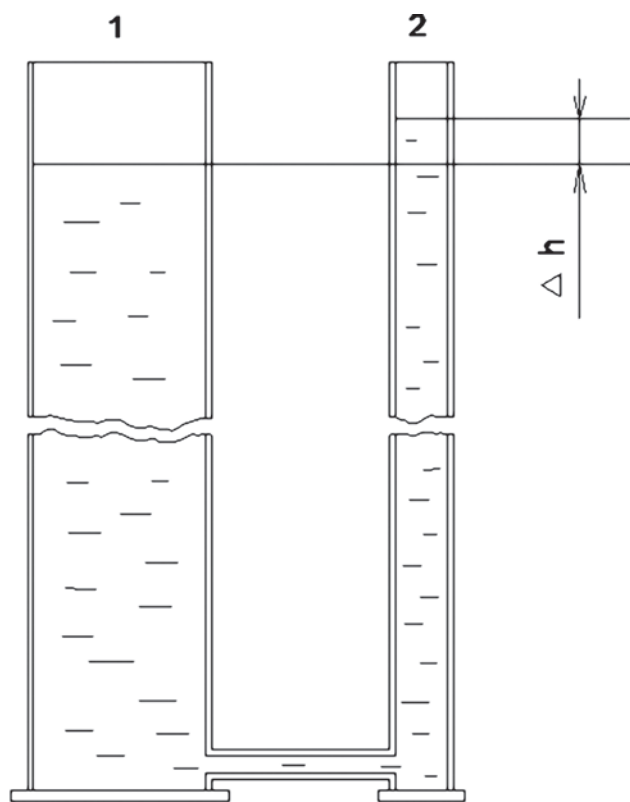


Рис. 1. Разница уровней воды в резервуарах эталона: 1 — резервуар эталона для размещения поверяемого уровнемера; 2 — резервуар эталона для размещения интерферометрического уровнемера; Δh — разница уровней воды в резервуарах

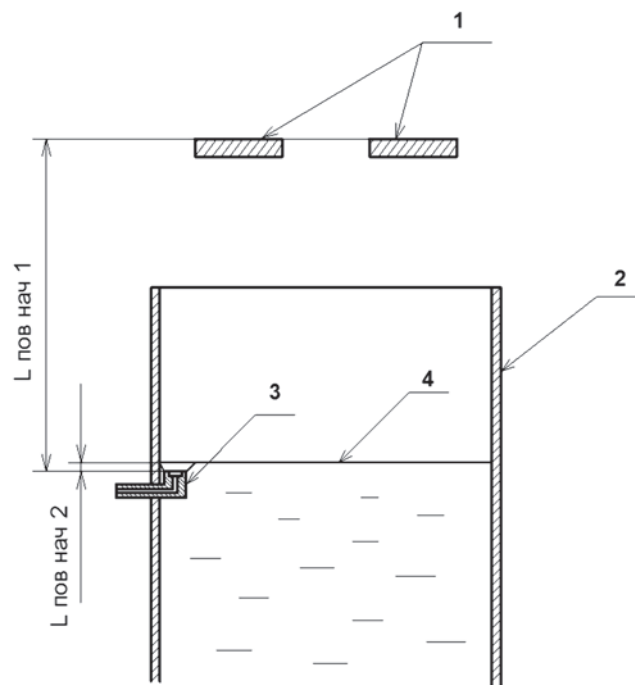


Рис. 2. Измерение начального расстояния $L_{\text{пов нач}}$ от установочной плоскости датчика уровнемера до поверхности воды: 1 — установочная платформа; 2 — резервуар эталона; 3 — сливное отверстие; 4 — поверхность воды; $L_{\text{пов нач}} = L_{\text{пов нач 1}} - L_{\text{пов нач 2}}$

Кроме того, в процессе усовершенствования было исследовано изменение расстояния от оптического отражателя на поплавке до поверхности воды при изменении температуры воды. На рис. 3 показан график зависимости расстояния от оптического отражателя на поплавке до поверхности воды от температуры воды. Эта зависимость также периодически проверяется.

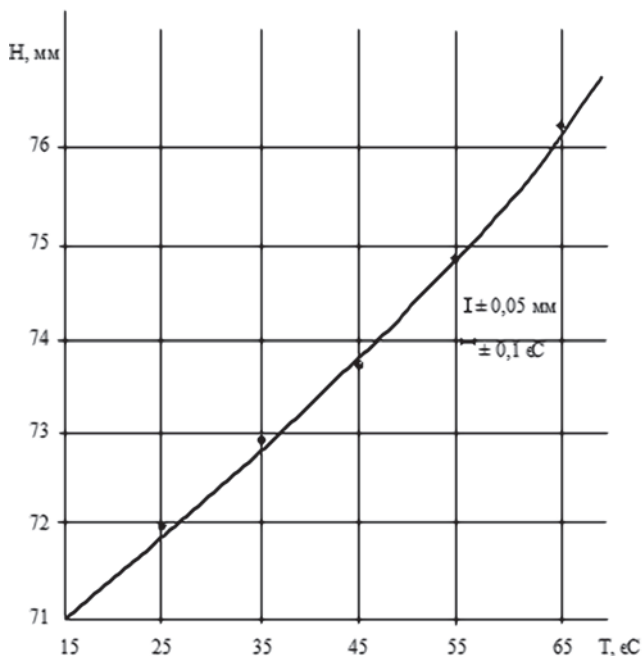


Рис. 3. График зависимости расстояния от оптического отражателя на поплавке до поверхности воды от температуры воды

Таким образом, расстояние от верха платформы для установки поверяемого уровнемера до поверхности воды $L_{\text{пов}}$ равно сумме начального расстояния от платформы до поверхности воды $L_{\text{пов нач}}$, приращения расстояния $L_{\text{прир}}$, измеряемого интерферометром, и величины изменения расстояния от уголкового отражателя (УО) на поплавке до поверхности воды $L_{\text{УО-пов}}(T_{\text{в}})$:

$$L_{\text{пов}} = L_{\text{пов нач}} + L_{\text{прир}} + L_{\text{УО-пов}}(T_{\text{в}}), \quad (1)$$

где $T_{\text{в}}$ — температура воды в ее поверхностном слое, которая должна измеряться при проведении метрологических работ.

Погрешность зависимости $L_{\text{УО-пов}}(T_{\text{в}})$ составляет

$$\Delta_{L_{\text{УО-пов}}(T_{\text{в}})} = 0,08 \text{ мм.}$$

Расстояние $L_{\text{прир}}$, измеряемое интерферометрическим методом, определяется числом $a_{\text{к}}$ длин волн в вакууме $\lambda_{\text{вак}}$ оптического излучения и показателем преломления воздуха n :

$$L_{\text{прир}} = \frac{a_{\text{к}} \cdot \lambda_{\text{вак}}}{2n} = \frac{L_{\text{прир вак}}}{n}.$$

Показатель преломления n находится из выражения [4]

$$(n-1) \cdot 10^8 = 38,3639197 \cdot p \times \left[\frac{1 + p(0,817 - 0,0133t) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,0036610t} \right] - 5,60794336e,$$

где p — величина атмосферного давления, мм рт.ст.; t — температура воздуха, °С; e — парциальное давление водяного пара, мм рт.ст.

После преобразования и перехода от давления p в мм рт.ст. в значение p' в кПа получим

$$n-1 = 2,878 \cdot 10^{-6} p' \cdot \left[\frac{1 + p'(6,128 - 0,0998t) \cdot 10^{-6}}{1 + 0,00366t} \right] - 5,608e,$$

где e — парциальное давление водяного пара в воздухе, мм рт.ст.,

$$e = 0,75 E_{\text{в}} \frac{\phi\%}{100}.$$

Здесь

$$\lg E_{\text{в}} = 23,832 - \frac{2948,5}{T} - 5,028 \cdot \lg T;$$

T — температура воздуха, К; ϕ — относительная влажность, %.

Для получения погрешности определения коэффициента преломления численным методом были рассчитаны зависимости значения $(n-1) \cdot 10^8$ от атмосферного давления для опорных значений температуры $t = 20$ °С и относительной влажности $\phi = 60$ %, от температуры воздуха для опорных значений атмосферного давления $p' = 101,4$ кПа и влажности $\phi = 60$ %, от влажности воздуха для опорных значений температуры $t = 20$ °С и атмосферного давления $p' = 101,4$ кПа. Соответствующие графики приведены на рис. 4–6. С учетом того, что все три зависимости близки к линейным, численные значения частных производных приняты равными:

$$\frac{\partial n}{\partial p'} \approx 2,7 \cdot 10^{-6} (\text{кПа})^{-1};$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} \approx 1 \cdot 10^{-6} (^\circ\text{C})^{-1};$$

$$\frac{\partial n}{\partial \phi} \approx 1 \cdot 10^{-8} (\%)^{-1}.$$

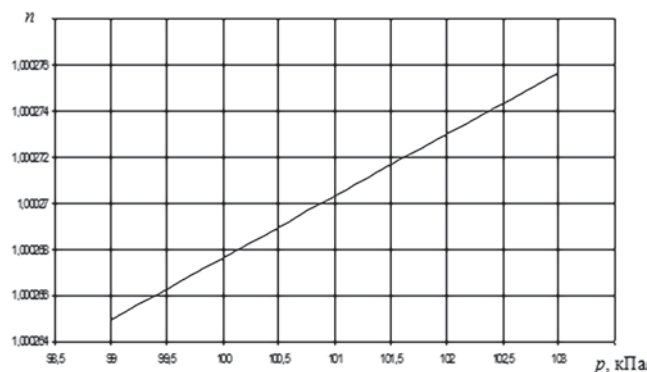


Рис. 4. График зависимости коэффициента преломления воздуха от атмосферного давления для опорных значений температуры $t = 20$ °С и относительной влажности $\phi = 60$ %

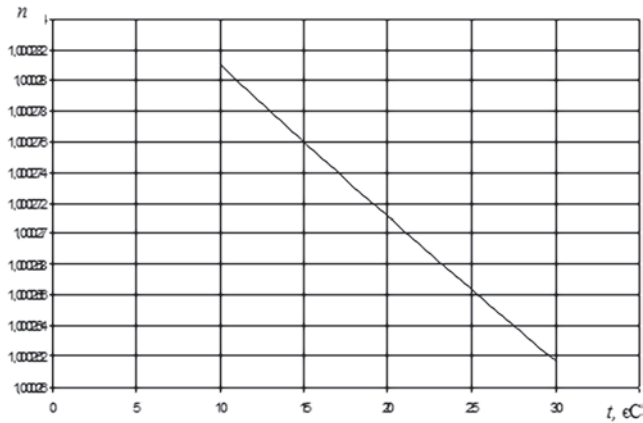


Рис. 5. График зависимости коэффициента преломления воздуха от температуры воздуха для опорных значений атмосферного давления $p' = 101,4$ кПа и влажности $\varphi = 60\%$

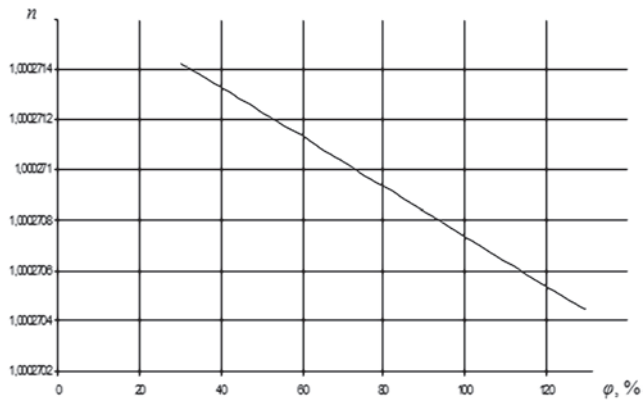


Рис. 6. График зависимости коэффициента преломления воздуха от влажности для опорных значений температуры $t = 20$ °С и атмосферного давления $p' = 101,4$ кПа

Составляющая стандартной неопределенности типа В воспроизведения единицы уровня, обусловленная стандартной неопределенностью типа В расчета коэффициента преломления воздуха $u_{B Ln}$,

$$u_{B Ln} = \frac{\partial L_{\text{прир}}}{\partial n} \cdot u_{Bn}, \quad (2)$$

равна

$$u_{Bn} = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial p'}\right)^2 \cdot u_{Bp'}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)^2 \cdot u_{Bt}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \phi}\right)^2 \cdot u_{B\phi}^2},$$

где $u_{Bp'}$, u_{Bt} , $u_{B\phi}$ — стандартные неопределенности типа В измерения атмосферного давления, кПа, температуры воздуха, °С, и относительной влажности, %, соответственно.

Из формул (1) и (2) получим выражение для стандартной неопределенности типа В эталона:

$$u_B = \left\{ \begin{aligned} & u_{B L_{\text{пов нач}}}^2 + \frac{L_{\text{прир}}^2}{n^2} \cdot \left[\left(\frac{\partial n}{\partial p'}\right)^2 \cdot u_{Bp'}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)^2 \cdot u_{Bt}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \phi}\right)^2 \cdot u_{B\phi}^2 \right] + \\ & + \left(\frac{\partial L_{\text{YO-пов}}}{\partial t_{\text{воды}}}\right)^2 \cdot u_{Bt > 4K}^2 + u_{B La}^2 \end{aligned} \right\}^{1/2},$$

где $u_{B La}$ — составляющая стандартной неопределенности типа В, обусловленная изменением длины волны лазера в вакууме (не более $2 \cdot 10^{-7}$ мкм) и на расстоянии 20 м не превышающая 0,004 мм;

$$\frac{\partial L_{\text{YO-пов}}}{\partial t_{\text{воды}}}$$

коэффициент, который на данное время составляет 0,1 мм/°С и должен проверяться в случае изменения конструкции, объема и массы поплавка.

Значение слагаемого

$$\frac{L_{\text{прир}}}{n} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial p'}\right)^2 \cdot u_{Bp'}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial t}\right)^2 \cdot u_{Bt}^2 + \left(\frac{\partial n}{\partial \phi}\right)^2 \cdot u_{B\phi}^2}$$

не превышает $\pm 0,03$ мм в случае, если $u_{Bp'} \leq \pm 0,3$ кПа, $u_{Bt} \leq \pm 1$ °С, $u_{B\phi} \leq 10\%$.

Для перехода от погрешности $\Delta_{L_{\text{пов нач}}}$ и

$$\left(\frac{\partial L_{\text{YO-пов}}}{\partial t_{\text{воды}}}\right) \cdot \Delta_{t_{\text{воды}}} = \Delta_{L_{\text{полн}}(T_B)}$$

к соответствующим составляющим стандартной неопределенности типа В будем считать, что основной частью указанных погрешностей является неисключенная систематическая погрешность, имеющая равномерное распределение, и

$$u_{B L_{\text{пов нач}}} = \frac{\Delta_{L_{\text{пов нач}}}}{\sqrt{3}}, \quad \left(\frac{\partial L_{\text{YO-пов}}}{\partial t_{\text{воды}}}\right) \cdot u_{Bt_{\text{воды}}} = \frac{\Delta_{L_{\text{полн}}(T_B)}}{\sqrt{3}}.$$

Таким образом, значение стандартной неопределенности типа В составляет

$$u_B = \sqrt{\frac{0,08^2}{3} + 0,03^2 + \frac{0,09^2}{3} + 0,004^2} = 0,08 \text{ мм.}$$

Значение стандартной неопределенности типа А находится по данным измерения расстояния до поверхности воды в резервуаре, когда вода не поступает в резервуар и не сливается из него (благодаря наличию небольших колебаний воды и шуму аппаратуры интерферометра, измеряемое расстояние изменяется по случайному закону):

$$u_A = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (L_{\text{пов } i} - L_{\text{пов ср}})^2}{m(m-1)}}, \quad m = 10,$$

где $L_{\text{пов}}$ и $L_{\text{пов ср}}$ — расстояние до поверхности воды и его среднее значение; m — количество наблюдений.

В результате расчетов получено значение $u_A = 0,01$ мм.

Суммарная неопределенность, в соответствии с [5], равна

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{0,08^2 + 0,01^2} = 0,08 \text{ мм.}$$

Расширенная неопределенность измерений эталона при доверительной вероятности 0,95 и коэффициенте охвата $k = 2$ составляет

$$U = k \cdot u_C = 2 \cdot 0,08 = 0,16 \text{ мм.}$$

В дальнейшем расширенная неопределенность измерений эталона принимается равной 0,2 мм.

Таким образом, после усовершенствования эталона на нем могут поверяться и калиброваться уровнемеры, погрешность которых не менее $\pm 0,5$ мм.

Список литературы

1. *Коронкевич В. П.* Современные лазерные интерферометры / В.П. Коронкевич, В.А. Ханов. — Новосибирск: Наука, 1985. — 182 с.
2. Меры длины концевые плоскопараллельные. Технические условия: ДСТУ ГОСТ 9038:2009.— [Чинний від 1991–07–01].— М.: Изд-во стандартов, 1990.— 14 с.
3. Штангенглубиномеры. Технические условия: ДСТУ ГОСТ 162:2009.— [Чинний від 1991–01–01].— М.: Изд-во стандартов, 1990.— 10 с.
4. *Bonsech G.* Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulae / G. Bonsech, E. Potulski. — Metrologia.— 1998.— № 3.— P. 133–139.
5. ГСИ. Применение “Руководства по выражению неопределенности измерений”: РМГ 43–2001.— [Введ. 2003–07–01].— Минск: Изд-во стандартов, 2002.— 15 с.