

Уровнемерная установка УУЭ1р-Н-20 на основе лазерной интерферометрической измерительной системы

Вадим Шамилевич Биккулов^{1✉}, Александр Викторович Кондаков²

^{1, 2} Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии – филиал ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Казань, Россия

¹altroir@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-8204-3466>

²avkondakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4811-2226>

Аннотация. Рассмотрены методы повышения точности измерений уровня жидкости. Представлена уровнемерная установка УУЭ1р-Н-20 на основе лазерной интерферометрической измерительной системы XL-80 с непосредственным изменением уровня жидкости в диапазоне 0–20 м. Принцип действия измерительной системы уровнемерной установки основан на измерении линейных перемещений поплавка, находящегося в жидкости, относительно нулевой точки отсчёта уровнемерной установки. Приведена математическая модель определения уровня жидкости с помощью уровнемерной установки с учётом влияния параметров окружающей среды на элементы измерительной системы. Рассчитаны метрологические характеристики уровнемерной установки, в том числе неопределённости измерений уровня жидкости. Доверительные границы суммарной погрешности измерений единицы уровня жидкости с доверительной вероятностью 0,95 составляют $\pm 0,11$ мм при передаче единицы уровня жидкости эталонам или средствам измерений уровня жидкости с фиксированной нулевой точкой отсчёта и $\pm 0,044$ мм при передаче единицы уровня жидкости эталонам или средствам измерений уровня жидкости, не имеющим фиксированной нулевой точки отсчёта.

Ключевые слова: измерение уровня, уровень жидкости, уровень сыпучих материалов, уровнемерная установка, уровнемер, неопределённость, эталон уровня

Для цитирования: Биккулов В. Ш., Кондаков А. В. Уровнемерная установка УУЭ1р-Н-20 на основе лазерной интерферометрической измерительной системы // Измерительная техника. 2022. № 9. С. 45–51. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-9-45-51>

Level-measuring installation UUE1r-N-20 based on a laser interferometric measuring system

Vadim Sh. Bikkulov^{1✉}, Alexander V. Kondakov²

^{1, 2} VNIIR – Affiliated Branch of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Kazan, Russia

¹altroir@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-8204-3466>

²avkondakov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4811-2226>

Abstract. Methods of increasing the accuracy of liquid level measurements are considered. The level-measuring installation UUE1r-N-20 with a direct change in the liquid level in the range of 0–20 m with a measuring system based on the XL-80 laser interferometric measuring system is presented. The principle of operation of the measuring system of the level-measuring installation is based on measuring the linear movements of the float in the liquid relative to the zero reference point of the level-measuring installation. A mathematical model is given for determining the liquid level using a level-measuring installation, taking into account the influence of environmental parameters on the elements of the measuring system. The metrological characteristics of the level-measuring installation, including the uncertainty of liquid level measurements, are calculated. The confidence limits of the total measurement error of a liquid level unit with a confidence probability of 0.95 are ± 0.11 mm when transferring a liquid level unit to standards or liquid level measuring instruments with a fixed zero reference point and ± 0.044 mm when transferring a liquid level unit to standards or liquid level measuring instruments that do not have a fixed zero reference point.

Keywords: level measurement, liquid level, level of bulk materials, level-measuring installation, level-meter, uncertainty, level standard

Введение. Одной из целей Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года¹

является создание условий, способствующих построению инновационной экономики. Внедрение и освоение новых

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2017 г. № 737-р «Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года».

научно-технических инновационных технологий предъявляет повышенные требования к точности измерений. Основными направлениями и приоритетами развития системы обеспечения единства измерений Российской Федерации является развитие эталонной базы и повышение уровня метрологического обеспечения приоритетных направлений развития науки, технологий и техники.

В 1989 г. во Всесоюзном научно-исследовательском институте расходомерии (в настоящее время ВНИИР – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева») разработана и изготовлена установка уровнемерная эталонная УУЭ1р-Н-20 (далее – уровнемерная установка) [1] по аналогии с эталонной уровнемерной установкой УУО-Н-1, описанной в ГОСТ 8.321-78². Измерительный участок уровнемерной установки располагается в шахте главного здания ВНИИР. По всей высоте шахты установлены семь кондиционеров воздуха для задания и поддержания температуры окружающей среды и жидкости при эксплуатации уровнемерной установки. Два сосуда измерительного участка уровнемерной установки заполняются жидкостью (водой) из одного резервуара, расположенного на первом этаже шахты, в связи с чем в оба сосуда измерительного участка поступает жидкость с одинаковыми температурой и плотностью.

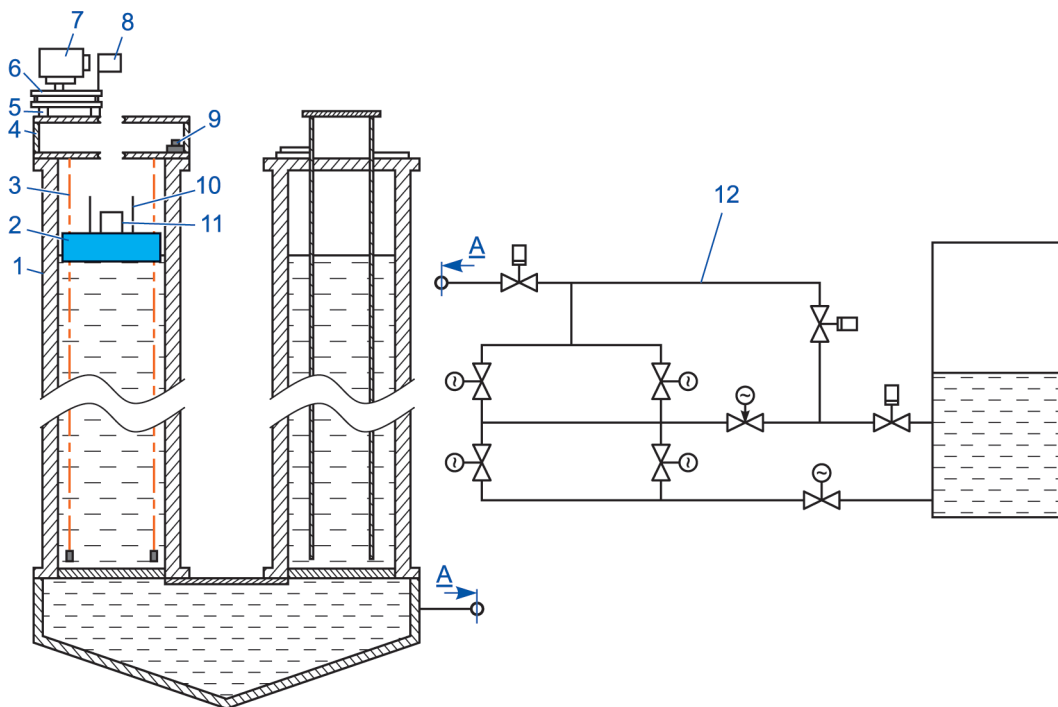


Рис. 1. Уровнемерная установка на основе лазерной интерферометрической измерительной системы XL-80:

1 – измерительный участок; 2 – поплавок; 3 – направляющие поплавка; 4 – каркас; 5 – проставки; 6 – юстировочная платформа; 7 – блок системы лазерной измерительной XL-80; 8 – делитель пучка излучения лазера; 9 – блок компенсации XC-80; 10 – защитный кожух; 11 – уголкового отражателя; 12 – гидравлическая система

Fig. 1. Reference level-measurement system with an upgraded measuring system:

1 – measuring section; 2 – float; 3 – float guides; 4 – frame; 5 – spacers; 6 – adjustment platform; 7 – laser measuring system unit XL-80; 8 – laser beam divider; 9 – compensation unit XC-80; 10 – protective casing; 11 – angle reflector; 12 – hydraulic system

Изменение температуры окружающей среды и жидкости (воды) в измерительном участке во время измерений не превышает $\pm 4,0$ °С. В 2020 г. модернизирована измерительная система уровнемерной установки – эталонная измерительная лента 3-го разряда заменена на лазерную интерферометрическую измерительную систему XL-80 [2].

Цель настоящей работы – исследование точностных характеристик уровнемерной установки на основе лазерной интерферометрической измерительной системы XL-80.

Измерительная система уровнемерной установки.

Принцип действия модернизированной измерительной системы уровнемерной установки (рис. 1) основан на измерении линейных перемещений поплавка относительно нулевой точки отсчёта уровнемерной установки с помощью лазерной интерферометрической измерительной системы XL-80 (далее – системы XL-80) [3]. Поплавок измерительной системы уровнемерной установки перемещается вдоль направляющих при увеличении или уменьшении уровня воды в измерительном участке уровнемерной установки. Направляющие представляют собой два троса, закреплённых в верхней части измерительного участка. Для обеспечения вертикальности

направляющих к их нижним частям прикреплены грузы массой 10 кг каждый. Блок системы XL-80 вместе с делителем пучка излучения лазера смонтирован на юстировочной платформе, которая служит для выставления вертикальности лазерного луча. Система юстировки (рис. 2, а) содержит маятник, вывешиваемый по оси движения поплавка. Маятник состоит из лески и груза в форме конуса, основание которого содержит юстировочную мишень с юстировочными кольцами. Юстировочные кольца нанесены от центра основания конуса вдоль его радиуса с шагом в 5 мм (рис. 2, б).

Подготовка уровнемерной установки к работе.

Для выравнивания расстояний по вертикали от лески маятника до лазерного луча в верхней части измерительной системы J_1 и до лазерного луча на уровне отвеса маятника J_2 юстируют лазерный луч измерительной системы. При юстировке с помощью

² ГОСТ 8.321-78. ГСИ. Уровнемеры промышленного применения и поплавковые. Методы и средства поверки.

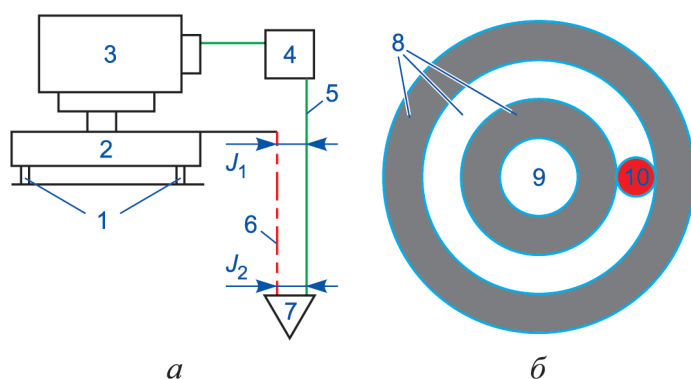


Рис. 2. Система юстировки вертикальной оси лазерного луча (а) и юстировочная мишень (б):

1 – регулировочные опоры платформы; 2 – платформа; 3 – лазерный блок; 4 – делитель пучка излучения лазера; 5 – лазерный луч; 6 – леска маятника; 7 – отвес маятника; 8 – юстировочные кольца; 9 – место крепления лески маятника; 10 – световое пятно лазерного луча

Fig. 2. Alignment system of the vertical axis of the laser beam (a) and alignment target (b):

1 – adjusting platform supports; 2 – platform; 3 – laser block; 4 – divider; 5 – laser beam; 6 – pendulum line; 7 – pendulum plumb line; 8 – the alignment rings; 9 – the attachment point of the pendulum line; 10 – the light spot of the laser beam

регулируемых опор регулируют плоскость платформы, на которой установлен лазерный блок и делитель. Лазерный луч измерительной системы юстируется один раз в месяц либо при потере сигнала блоком системы XL-80.

Точка отсчёта системы XL-80 может быть любой, принадлежащей диапазону измерений. В соответствии с ГОСТ 8.570-2000³ уровень жидкости – расстояние по вертикали между свободной поверхностью жидкости в резервуаре и плоскостью, принятой за начало отсчёта.

Средства измерений (СИ) уровня жидкости [4] разделяются на СИ, имеющие и не имеющие фиксированную нулевую точку отсчёта. Под фиксированной нулевой точкой отсчёта подразумевается фланец или иной стационарный элемент СИ уровня жидкости, относительно которого измеряется расстояние до поверхности жидкости. Затем измеренное расстояние пересчитывают в уровень жидкости [5]. СИ уровня жидкости, не имеющие фиксированной нулевой точки отсчёта, измеряют расстояние до поверхности жидкости относительно точки отсчёта, выбранной в любом месте измеряемого диапазона. Это расстояние также пересчитывается в значение уровня жидкости.

Так как большинство уровнемеров имеют фиксированную нулевую точку отсчёта [6], то на уровнемерной установке необходимо определять нулевую (начальную) точку отсчёта. Для этого измеряют расстояние от фланца для монтажа уровнемеров до контактов сигнализатора уровня жидкости, который жёстко закреплён в верхней части измерительного участка (рис. 3). Штангенциркулем определяют какой из контактов сигнализатора уровня жидкости находится

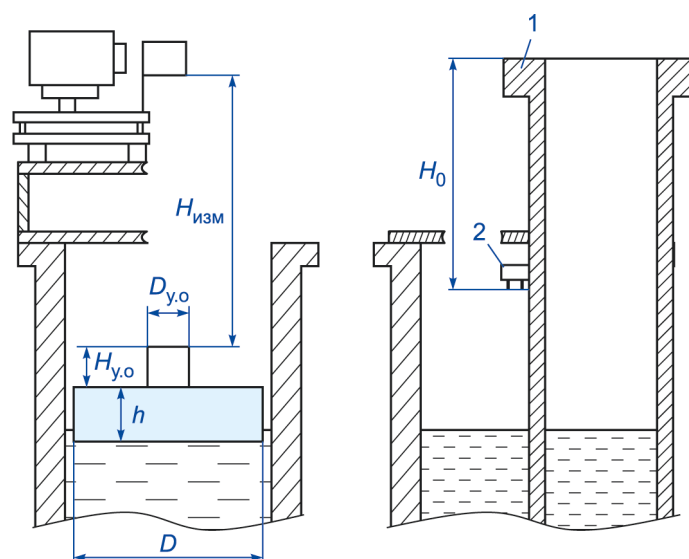


Рис. 3. Нулевая (начальная) точка отсчёта и входные данные математической модели уровнемерной установки:

1 – фланец для монтажа уровнемеров; 2 – сигнализатор уровня жидкости

Fig. 3. The zero (initial) reference point and input data of the mathematical model of the reference level-measurement system:

1 – flange for mounting level gauges; 2 – liquid level indicator

ближе по высоте к фланцу и измеряют расстояние H_0 от этого контакта до фланца.

Сигнализатор уровня жидкости срабатывает в момент касания поверхности жидкости обоих контактов. Измерительный участок установки заполняют водой до срабатывания сигнализатора уровня, затем сливают небольшое количество воды, чтобы сигнализатор уровня перестал срабатывать. Добавляют жидкость малыми дозами до момента срабатывания сигнализатора уровня. Нулевую точку отсчёта уровнемерной установки определяют при получении метрологических характеристик каждого уровнемера, имеющего нулевую точку отсчёта.

Если во время измерений потерял сигнал блока системы XL-80, то процесс останавливают, опять юстируют лазерный луч измерительной системы, определяют нулевую точку отсчёта и заново начинают процесс измерений.

Математическая модель определения уровня жидкости на уровнемерной установке. Входные данные математической модели уровнемерной установки приведены на рис. 3. Отклонение пути лазерного луча от оси движения поплавка приводит к расхождению измеренного расстояния от фактически пройденного [7] и к так называемой «ошибке косинуса». Измеренное системой XL-80 перемещение $H_{изм}$ с учётом «ошибки косинуса» H_{cos} вычислим из формулы

$$H_{cos} = H_{изм} \cos[\pi/2 - \arctg(20/J)],$$

где J – смещение положения лазерного луча системы XL-80 в нижнем положении юстировочной мишени относительно

³ ГОСТ 8.570-2000. ГСИ. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки.

его положения в верхнем положении юстировочной мишени (J не должно превышать ширину юстировочных колец), $J=0,00500$ м.

Уровень жидкости в установке рассчитаем по формуле

$$H_y = H_6 - H_9,$$

где H_6 – коэффициент пересчёта измеренного расстояния до поверхности жидкости в значение уровня жидкости, который принимают равным значению базовой высоты, заданной для уровнемера; H_9 – расстояние от фланца, предназначенного для монтажа уровнемеров, до поверхности жидкости (эталонное расстояние).

Расстояние H_9 найдём по формуле

$$H_9 = H_{\cos} + H_0 + h_{\text{нв}}^{\text{к.т}} - h_{\text{нв}}^{\text{н.т}},$$

где $H_0=0,41047$ м; $h_{\text{нв}}^{\text{к.т}}$, $h_{\text{нв}}^{\text{н.т}}$ – высоты надводной части поплавка при параметрах окружающей среды во время измерений с помощью уровнемерной установки контрольной и нулевой точек отсчёта соответственно.

На плавучесть поплавка, находящегося в воде, оказывают влияние такие параметры окружающей среды, как плотности воды и воздуха, атмосферное давление и температура окружающей среды [8]. Поплавок имеет форму цилиндра, высота надводной части рассчитывается по формуле

$$h_{\text{нв}}^{\text{к.т}} = \bar{h}(1 + \alpha_{\text{п}} \tau) - h_{\text{нв}}^{\text{к.т}}, \quad (1)$$

где $\bar{h}$ – среднее арифметическое значение измерений высоты цилиндрической части поплавка в 16 точках, равномерно распределённых по длине окружности поплавка, $\bar{h}=0,04982$ м; $\alpha_{\text{п}}$ – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материала поплавка, $\alpha_{\text{п}}=4,5 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [9]; $\tau=t-t_0$; t , t_0 – температуры окружающего воздуха в контрольной и нулевой точках уровнемерной установки, t , $t_0=16 \dots 24 \text{ } ^\circ\text{C}$; $h_{\text{нв}}^{\text{к.т}}$ – высота цилиндрической части поплавка, находящейся под водой, с учётом влияния параметров окружающей среды в контрольной точке уровнемерной установки, рассчитываемая по формуле

$$h_{\text{нв}}^{\text{к.т}} = \left[\bar{m} + \rho_{\text{в}(m)}(V + V_{\text{y.o}} + V_{\text{к}}) - \rho_{\text{в}}(V(1 + 3\alpha_{\text{п}}\tau) + V_{\text{y.o}}(1 + 3\alpha_{\text{y.o}}\tau) + V_{\text{к}}(1 + 3\alpha_{\text{к}}\tau)) \right] \times \left[(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{в}})(1 + 2\alpha_{\text{п}}\tau)\pi\bar{D}^2/4 \right]^{-1}; \quad (2)$$

$\bar{m}$ – среднее арифметическое значение по результатам 11 взвешиваний массы поплавка с установленными на него уголкового отражателем и защитным кожухом, без учёта влияния выталкивающей силы воздуха во время взвешивания, $\bar{m}=0,92267$ кг; $\rho_{\text{в}(m)}$ – плотность воздуха при взвешивании поплавка с установленным на него уголкового отражателем; V , $V_{\text{y.o}}$, $V_{\text{к}}$ – объёмы цилиндрической части поплавка, уголкового отражателя и защитного кожуха

соответственно, $V=\pi\bar{D}^2/4$; $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотности соответственно воздуха во время измерения уровня жидкости в контрольной точке уровнемерной установки и жидкости в измерительном участке уровнемерной установки при измерениях в контрольной точке в месте нахождения поплавка; $\alpha_{\text{y.o}}=13 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{\text{к}}=70 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ – ТКЛР материала корпуса уголкового отражателя и защитного кожуха соответственно; $\bar{D}$ – среднее арифметическое значение измерений диаметра цилиндрической части поплавка в 8 точках, равномерно распределённых по длине окружности поплавка, $\bar{D}=0,48104$ м.

Плотность воздуха при взвешивании поплавка с установленным на него уголкового отражателем вычисляется в соответствии с ГОСТ OIML R 111-1-2009⁴ по формуле

$$\rho_{\text{в}(m)} = \left(\frac{0,34848P_m - 0,009024hr_me^{0,0612t_m}}{273,15 + t_m} \right), \quad (3)$$

где P_m , hr_m , t_m – соответственно атмосферное давление, относительная влажность и температура окружающего воздуха во время взвешивания поплавка, $P_m=840 \dots 1060$ гПа; $hr_m=10 \dots 80 \%$; $t_m=16 \dots 24 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Плотности воздуха при измерениях уровня жидкости в контрольной и нулевой точках уровнемерной установки вычисляются аналогично плотности $\rho_{\text{в}(m)}$ при указанных выше значениях атмосферного давления, относительной влажности и температуры окружающего воздуха (см. формулу (3)).

Объём уголкового отражателя рассчитаем как

$$V_{\text{y.o}} = \bar{H}_{\text{y.o}}\pi\bar{D}_{\text{y.o}}^2/4,$$

где $\bar{D}_{\text{y.o}}$, $\bar{H}_{\text{y.o}}$ – средние арифметические значения измерений соответственно диаметра и высоты уголкового отражателя в 11 точках, равномерно распределённых по длине окружности уголкового отражателя, $\bar{D}_{\text{y.o}}=0,08000$ м; $\bar{H}_{\text{y.o}}=0,06461$ м.

Объём защитного кожуха вычислим по формуле

$$V_{\text{к}} = \pi\bar{H}_{\text{к}}(\bar{D}_{\text{к.вн}}\bar{\delta} + \bar{\delta}^2),$$

где $\bar{H}_{\text{к}}$, $\bar{D}_{\text{к.вн}}$, $\bar{\delta}$ – средние арифметические значения результатов измерений соответственно высоты, внутреннего диаметра и толщины стенки защитного кожуха в 11 точках, равномерно распределённых по длине окружности кожуха (пять и шесть измерений в верхней и нижней частях кожуха соответственно), $\bar{H}_{\text{к}}=0,30009$ м; $\bar{D}_{\text{к.вн}}=0,14978$ м; $\bar{\delta}=0,00114$ м.

Высоты надводной и подводной частей поплавка с учётом влияния условий окружающей среды при измерениях нулевой точки отсчёта рассчитаем по формулам, аналогичным (1), (2) соответственно, подставив вместо τ параметр $\gamma=t_0-t_m$, причём плотность воздуха в нулевой точке уровнемерной установки определяется по формуле, аналогичной (3), с теми же значениями атмосферного давления, относительной влажности и температуры окружающего

⁴ ГОСТ OIML R 111-1-2009. ГСИ. Гири классов E_1 , E_2 , F_1 , F_2 , M_1 , M_{1-2} , M_2 , M_{2-3} и M_3 . Часть 1. Метрологические и технические требования.

воздуха, а плотность жидкости измеряется в измерительном участке уровнемерной установки в месте нахождения поплавка в нулевой точке отсчёта.

Необходимо отметить, что изменение температуры в месте расположения лазерного блока системы XL-80 во время измерений не должно превышать $\pm 1,0^\circ\text{C}$.

Расчёт метрологических характеристик уровнемерной установки. Среднее квадратическое отклонение (СКО) измерений уровня жидкости на уровнемерной установке определим по формуле

$$S = \sqrt{S^2(K_c) + \sum_{i=1}^{20} S_i^2}; \quad (4)$$

$$S_1 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_0} S(H_0); \quad S_2 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{y.o}} S(\bar{H}_{y.o});$$

$$S_3 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial h} S(\bar{h}); \quad S_4 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial D} S(\bar{D});$$

$$S_5 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial m} S(\bar{m}); \quad S_6 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \rho_{\text{ж}}} S(\rho_{\text{ж}});$$

$$S_7 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \rho_{\text{ж}0}} S(\rho_{\text{ж}0}); \quad S_8 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P_0} S(P_0);$$

$$S_9 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr_0} S(hr_0); \quad S_{10} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P} S(P);$$

$$S_{11} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr} S(hr); \quad S_{12} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t_0} S(t_0);$$

$$S_{13} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t} S(t); \quad S_{14} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial D_{y.o}} S(\bar{D}_{y.o});$$

$$S_{15} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{\text{к}}} S(\bar{H}_{\text{к}}); \quad S_{16} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \delta} S(\bar{\delta});$$

$$S_{17} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial D_{\text{к.вн}}} S(\bar{D}_{\text{к.вн}}); \quad S_{18} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P_m} S(P_m);$$

$$S_{19} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr_m} S(hr_m); \quad S_{20} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t_m} S(t_m),$$

где $S(K_c) = 3,834 \cdot 10^{-5}$ м – СКО индикации срабатывания сигнализатора уровня жидкости при контакте с жидкостью; $\rho_{\text{ж}0}$ – плотность жидкости в нулевой точке отсчёта.

Доверительные границы суммарной неисключённой систематической погрешности (НСП) результатов измерений

уровня жидкости $\theta(P)$, при доверительной вероятности 0,95, вычисляют по формуле

$$\theta(P) = k \sqrt{\theta_{K_c}^2 + \sum_{i=1}^{23} \theta_i^2}; \quad (5)$$

$$\theta_1 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{\text{изм}}} \theta_{H_{\text{изм}}}; \quad \theta_2 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial J} \theta_J; \quad \theta_3 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_0} \theta_{H_0};$$

$$\theta_4 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{y.o}} \theta_{H_{y.o}}; \quad \theta_5 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial h} \theta_h; \quad \theta_6 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial D} \theta_D;$$

$$\theta_7 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial m} \theta_m; \quad \theta_8 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \rho_{\text{ж}}} \theta_{\rho_{\text{ж}}}; \quad \theta_9 = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \rho_{\text{ж}0}} \theta_{\rho_{\text{ж}0}};$$

$$\theta_{10} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P_0} \theta_{P_0}; \quad \theta_{11} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr_0} \theta_{hr_0}; \quad \theta_{12} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P} \theta_P;$$

$$\theta_{13} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr} \theta_{hr}; \quad \theta_{14} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t_0} \theta_{t_0}; \quad \theta_{15} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t} \theta_t;$$

$$\theta_{16} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial D_{y.o}} \theta_{D_{y.o}}; \quad \theta_{17} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{\text{к}}} \theta_{H_{\text{к}}}; \quad \theta_{18} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \delta} \theta_{\delta};$$

$$\theta_{19} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial H_{\text{к.вн}}} \theta_{H_{\text{к.вн}}}; \quad \theta_{20} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial P_m} \theta_{P_m}; \quad \theta_{21} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial hr_m} \theta_{hr_m};$$

$$\theta_{22} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial t_m} \theta_{t_m}; \quad \theta_{23} = \frac{\partial H_{\text{э}}}{\partial \alpha_{\text{п}}} \theta_{\alpha_{\text{п}}},$$

где $k=1,1$ для $P=0,95$; $\theta_{K_c}=0,05 \cdot 10^{-5}$ м – НСП срабатывания сигнализатора уровня жидкости при контакте с жидкостью – пределы допускаемой абсолютной погрешности линейных измерений системы XL-80.

Стандартные неопределённости измерений уровня жидкости по типам А, В, суммарную стандартную и расширенную неопределённости оценим согласно ГОСТ 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008⁵.

Стандартные неопределённости измерений [10] уровня жидкости по типам А, В соответственно

$$u_A = S; \quad u_B = \theta(P) / (k\sqrt{3}),$$

где $S, \theta(P)$ определены по (4), (5).

Суммарная стандартная неопределённость измерений уровня жидкости:

$$u_c = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

⁵ ГОСТ 34100.3-2017 / ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Межгосударственный стандарт. Неопределённость измерений. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения».

Расширенная неопределённость измерений уровня жидкости при доверительной вероятности $P=0,95$ и коэффициенте охвата $k=2$:

$$u(P) = k\sqrt{u_A^2 + u_B^2}.$$

Доверительные границы суммарной погрешности измерений уровня жидкости на уровнемерной установке вычислим в соответствии с ГОСТ 8.381-2009⁶ по формуле

$$\Delta_{\Sigma}(P) = \pm K_{\Sigma} S_{\bar{y}, \Sigma},$$

где $S_{\bar{y}, \Sigma}$ – суммарное СКО измерений уровня жидкости, обусловленное воздействием случайных погрешностей и НСП, K_{Σ} – коэффициент, определяемый доверительной вероятностью P и отношением случайных погрешностей и НСП;

$$S_{\bar{y}, \Sigma} = \sqrt{S_{\bar{y}}^2 + S_{\theta_{\bar{y}}}^2}; K_{\Sigma} = (r S_{\bar{y}} + \theta_{\bar{y}}) / (S_{\bar{y}} + S_{\theta_{\bar{y}}});$$

$$S_{\theta_{\bar{y}}} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_{xi}^2(P_j) / (3k_j^2)};$$

$\theta_{\bar{y}}$ вычисляют по формуле (5); $S_{\theta_{\bar{y}}}$ – СКО НСП измерений уровня жидкости; r – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности $P=0,95$; k_j – коэффициент, соответствующий доверительной вероятности $P_j=0,95$ при вычислении доверительных границ НСП.

Метрологические характеристики уровнемерной установки. В результате расчётов получены метрологические характеристики уровнемерной установки, представленные в таблице, где x_1, x_2 – уровни жидкости при передаче единицы уровня эталонам или СИ, соответственно имеющим и не имеющим фиксированную нулевую точку отсчёта.

На основании результатов расчёта метрологических характеристик установлено, что вклад в вычисленные доверительные границы суммарной погрешности измерений уровня жидкости на уровнемерной установке и расширенную неопределённость измерений уровня жидкости составляющих $\theta_4, \theta_{16}, \theta_{17}, \theta_{18}, \theta_{19}$ и θ_{21} пренебрежимо мал и данными составляющими можно пренебречь.

Заключение. Доверительные границы Δ_{Σ} суммарной погрешности измерений единицы уровня жидкости на уровнемерной установке с доверительной вероятностью 0,95 при передаче единицы уровня жидкости эталонам или СИ уровня жидкости, имеющим и не имеющим фиксированную нулевую точку отсчёта, составляют $\pm 0,11$ и $\pm 0,044$ мм соответственно.

Уровнемерная установка аттестована в качестве Государственного рабочего эталона единицы длины в области измерений уровня жидкости и сыпучих материалов 1 разряда (рег. № 3.1.ZZB.0401.2021, Приказ⁷ Росстандарта).

Метрологические характеристики уровнемерной установки

Характеристика	$x_1, \text{ м}$	$x_2, \text{ м}$	Характеристика	$x_1, \text{ м}$	$x_2, \text{ м}$
θ_{K_c}	$0,05 \cdot 10^{-5}$	0	S_1	$1,937 \cdot 10^{-5}$	0
θ_1	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	S_2	$0,00021 \cdot 10^{-5}$	$0,00021 \cdot 10^{-5}$
θ_2	$0,125 \cdot 10^{-5}$	$0,125 \cdot 10^{-5}$	S_3	$0,055 \cdot 10^{-5}$	$0,055 \cdot 10^{-5}$
θ_3	$5 \cdot 10^{-5}$	0	S_4	$0,139 \cdot 10^{-5}$	$0,139 \cdot 10^{-5}$
θ_4	$0,000024 \cdot 10^{-5}$	$0,000024 \cdot 10^{-5}$	S_5	$0,0012 \cdot 10^{-5}$	$0,0012 \cdot 10^{-5}$
θ_5	$0,0018 \cdot 10^{-5}$	$0,0018 \cdot 10^{-5}$	S_6	$0,133 \cdot 10^{-5}$	$0,133 \cdot 10^{-5}$
θ_6	$0,013 \cdot 10^{-5}$	$0,013 \cdot 10^{-5}$	S_7	$0,165 \cdot 10^{-5}$	$0,165 \cdot 10^{-5}$
θ_7	$0,020 \cdot 10^{-5}$	$0,020 \cdot 10^{-5}$	S_8	$0,0082 \cdot 10^{-5}$	$0,0082 \cdot 10^{-5}$
θ_8	$0,254 \cdot 10^{-5}$	$0,254 \cdot 10^{-5}$	S_9	$0,00022 \cdot 10^{-5}$	$0,00022 \cdot 10^{-5}$
θ_9	$0,316 \cdot 10^{-5}$	$0,316 \cdot 10^{-5}$	S_{10}	$0,0074 \cdot 10^{-5}$	$0,0074 \cdot 10^{-5}$
θ_{10}	$0,0313 \cdot 10^{-5}$	$0,0313 \cdot 10^{-5}$	S_{11}	$0,00025 \cdot 10^{-5}$	$0,00025 \cdot 10^{-5}$
θ_{11}	$0,0013 \cdot 10^{-5}$	$0,0013 \cdot 10^{-5}$	S_{12}	$0,489 \cdot 10^{-5}$	$0,489 \cdot 10^{-5}$
θ_{12}	$0,0283 \cdot 10^{-5}$	$0,0283 \cdot 10^{-5}$	S_{13}	$0,241 \cdot 10^{-5}$	$0,241 \cdot 10^{-5}$
θ_{13}	$0,0015 \cdot 10^{-5}$	$0,0015 \cdot 10^{-5}$	S_{14}	$0,000050 \cdot 10^{-5}$	$0,000050 \cdot 10^{-5}$
θ_{14}	$1,089 \cdot 10^{-5}$	$1,089 \cdot 10^{-5}$	S_{15}	$0,000038 \cdot 10^{-5}$	$0,000038 \cdot 10^{-5}$
θ_{15}	$0,537 \cdot 10^{-5}$	$0,537 \cdot 10^{-5}$	S_{16}	$0,022 \cdot 10^{-5}$	$0,022 \cdot 10^{-5}$
θ_{16}	$0,000039 \cdot 10^{-5}$	$0,000039 \cdot 10^{-5}$	S_{17}	$0,000057 \cdot 10^{-5}$	$0,000057 \cdot 10^{-5}$
θ_{17}	$0,0000035 \cdot 10^{-5}$	$0,0000035 \cdot 10^{-5}$	S_{18}	$0,00098 \cdot 10^{-5}$	$0,00098 \cdot 10^{-5}$
θ_{18}	$0,00092 \cdot 10^{-5}$	$0,00092 \cdot 10^{-5}$	S_{19}	$0,000038 \cdot 10^{-5}$	$0,000038 \cdot 10^{-5}$
θ_{19}	$0,0000069 \cdot 10^{-5}$	$0,0000069 \cdot 10^{-5}$	S_{20}	$0,248 \cdot 10^{-5}$	$0,248 \cdot 10^{-5}$
θ_{20}	$0,0037 \cdot 10^{-5}$	$0,0037 \cdot 10^{-5}$	S	$4,35 \cdot 10^{-5}$	$0,65 \cdot 10^{-5}$
θ_{21}	$0,00023 \cdot 10^{-5}$	$0,00023 \cdot 10^{-5}$	u_A	$4,35 \cdot 10^{-5}$	$0,65 \cdot 10^{-5}$
θ_{22}	$0,553 \cdot 10^{-5}$	$0,553 \cdot 10^{-5}$	u_B	$3,63 \cdot 10^{-5}$	$2,19 \cdot 10^{-5}$
θ_{23}	$3,199 \cdot 10^{-5}$	$3,199 \cdot 10^{-5}$	u_c	$5,66 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$
$\theta(P)$	$6,909 \cdot 10^{-5}$	$4,181 \cdot 10^{-5}$	$U(P)$	$11 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$
$S(K_c)$	$3,834 \cdot 10^{-5}$	0	$\Delta_{\Sigma}(0,95)$	$11 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$

⁶ ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

⁷ Приказ Росстандарта № 1996 от 09 сентября 2021 г. «Об утверждении эталона ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»».

Список источников

References

1. Биккулов В. Ш., Кондаков А. В., Гаранин И. О., Мигранов В. М. Описание государственного специального эталона единицы длины (уровня) в диапазоне 0,01–20 м // Законодательная и прикладная метрология. 2014. № 2 (129). С. 9–11.
2. Биккулов В. Ш., Кондаков А. В., Фромета Планче И. Перспективы применения лазерного интерферометра XL-80 компании Renishaw в качестве измерительного элемента на государственном специальном эталоне единицы длины (уровня) 1-го разряда // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2018. № 3. С. 15–17. <https://doi.org/10.30713/0132-2222-2018-3-15-17>
3. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Седухин А. Г., Ленкова Г. А. Лазерные интерферометрические и дифракционные системы // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 4–23.
4. Романова Р. Г., Марсутдинова Л. Р., Ситникова Е. Ю. Метрологическое обеспечение средств измерений уровня жидких и сыпучих веществ // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 6. С. 100–106.
5. Макартичан С. В., Жабин С. С., Кузнецова Н. С. Сравнительный анализ существующих методов измерения уровня жидкостей в резервуарах // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2021. № 2 (35). С. 36–41.
6. Винокуров Б. Б. Метрология и измерительная техника. Уровнеметрия жидких сред: учеб. пособие для академического бакалавриата. М.: Юрайт, 2016. 187 с.
7. Куликов А. В. Исследование точности лазерного интерферометра перемещений // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2014. Т. 5. № 2. С. 82–87.
8. Гаранин И. О., Кондаков А. В., Биккулов В. Ш., Рамазанова Л. Р. Исследование зависимости глубины погружения поплавка от атмосферного давления и относительной влажности воздуха // Вестник Казанского технологического университета, 2014. Т. 17. № 2. С. 126–128.
9. Мамонтов А. А., Ярцев В. П., Максимова А. А. Влияние плотности экструзионного пенополистирола Пеноплэкс® на его физико-механические свойства // Вестник ТГТУ. 2014. Т. 20. № 2. С. 342–348.
10. Кудряшова Ж. Ф., Чуновкина А. Г. Выражение точности средств измерений в соответствии с концепцией «неопределённость измерений» // Измерительная техника. 2003. № 6. С. 22–24.

1. Bikkulov V. Sh., Kondakov A. V., Garanin I. O., Migranov V. M., Opisaniye gosudarstvennogo spetsial'nogo etalona edinitsy dliny (urovnya) v diapazone 0,01–20 m, *Zakonodatel'naya i prikladnaya metrologiya*, 2014, no. 2 (129), pp. 9–11. (In Russ.)
2. Bikkulov V. Sh., Kondakov A. V., Frometa Planche I., *Automation, melemechanization and communication in oil industry*, 2018, no. 3, pp. 15–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30713/0132-2222-2018-3-15-17>
3. Koronkevich V. P., Poleshuk A. G., Sedukhin A. G., Lenkova G. A., Lazernye interferometricheskie i difraktsionnye sistemy, *Computer Optics*, 2010, vol. 34, no. 1, pp. 4–23. (In Russ.)
4. Romanova R. G., Marsutdinova L. R., Sitnikova E. Yu., Metrologicheskoe obespechenie sredstv izmerenii urovnya zhidkikh i sypuchikh veshchestv, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2020, vol. 23, no. 6, pp. 100–106. (In Russ.)
5. Makartichyan S. V., Zhabin S. S., Kuznetsova N. S., Sravnitel'nyi analiz sushchestvuyushchikh metodov izmereniya urovnya zhidkostei v rezervuarakh, *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport*, 2021, no. 2(35), pp. 36–41. (In Russ.)
6. Vinokurov B. B., *Metrologiya i izmeritel'naya tekhnika. Urovnemetriya zhidkikh sred. Uchebnoe posobie dlya akademicheskogo bakalavriata [Metrology and measuring technique. Level measurement of liquids: textbook manual for academic bachelor's degree]*, Moscow, Yurait Publ., 2016, 187 p. (In Russ.)
7. Kulikov A. V., Issledovanie tochnosti lazernogo interferometra peremeshchenii, *Interekspo Geo-Sibir'*, 2014, vol. 5, no. 2, pp. 82–87. (In Russ.)
8. Garanin I. O., Kondakov A. V., Bikkulov V. Sh., Ramazanova L. R., Issledovanie zavisimosti glubiny pogruzheniya poplavka ot atmosfernogo davleniya i otnositel'noi vlazhnosti vozdukha, *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 2, pp. 126–128. (In Russ.)
9. Mamontov A. A., Yartsev V. P., Maksimova A. A., Vliyanie plotnosti ekstruzionnogo penopolistirola Penopleks® na ego fiziko-mekhanicheskie svoistva, *Transactions TSTU*, 2014, vol. 20, no. 2, pp. 342–348. (In Russ.)
10. Kudryashova Zh. F., Chunovkina A. G., *Measurement Techniques*, 2003, vol. 46, no. 6, pp. 559–561. <https://doi.org/10.1023/A:1025455726761>

Статья поступила в редакцию 16.02.2022; одобрена после рецензирования 25.05.2022; принята к публикации 27.05.2022.
The article was submitted 16.02.2022; approved after reviewing 25.05.2022; accepted for publication 27.05.2022.