

И. О. Гаранин, А. В. Кондаков, В. Ш. Биккулов,
Л. Р. Рамазанова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ГЛУБИНЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПОПЛАВКА ОТ АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

Ключевые слова: эталон, измерение уровня, вода, выталкивающая сила воздуха, уровнемер, поплавки.

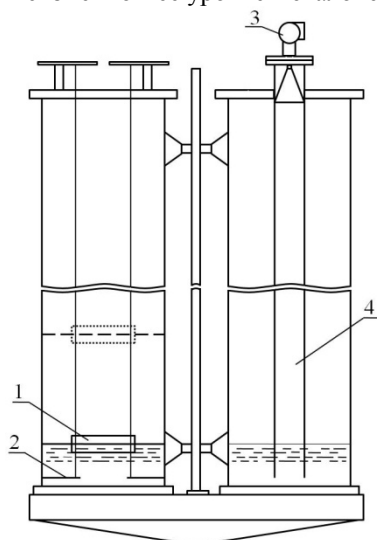
Представлен расчет зависимости глубины погружения поплавка от атмосферного давления и относительной влажности воздуха и обоснование необходимости учитывать выталкивающую силу воздуха при использовании поплавковых средств измерений.

Keywords: standard, level measurement, buoyancy in air, absolute error, level meter, float.

The work includes a report on the dependence of float insertion on atmospheric pressure and relative air humidity, as well as a statement of requirement of considering buoyancy in air during utilization of float-type measuring instruments.

Введение

На Государственном специальном эталоне единицы длины (уровня) 1-го разряда с диапазоном измерений 0,1-20 м [1] (далее – эталон) в качестве чувствительного элемента используется поплавок 1 Рис.1 поплавкового уровнемера [2]. На эталоне проверяются средства измерений уровня, применяемые для определения массы жидких веществ в нефтегазохимическом комплексе Российской Федерации [3]. Для определения влияния атмосферного давления и относительной влажности воздуха на глубину погружения поплавка уровнемера проведены исследования с целью определения влияния указанных факторов на точность измерений уровня. В качестве жидкости использована вода по ГОСТ 2874-82 [4]. В качестве объекта исследования рассмотрен поплавок (без гибкой механической связи с основной частью уровнемера) плавающий на поверхности жидкости при неизменном ее уровне в эталоне (рис 1).



1 - поплавок, 2 - нулевые стойки, 3 - поверяемый уровнемер, 4 - направляющая труба

Рис. 1 – Функциональная схема эталона

Поплавок имеет цилиндрическую форму, геометрические характеристики которого приведены на рис. 2. Объемная плотность поплавка равна

500 кг/м³ и масса поплавка составляет 3,150 кг.

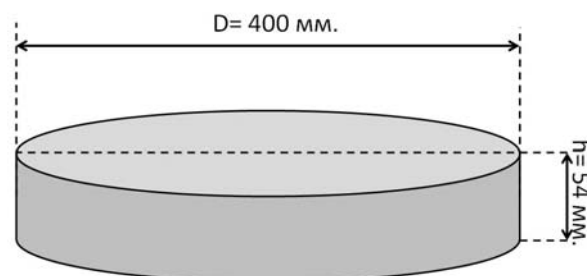


Рис. 2 – Схема поплавка УНКР.305446.036

Расчетная часть

В данной статье сначала проведен расчет глубины погружения поплавка в жидкость без учета выталкивающей силы воздуха. На поплавок в этом случае действуют две силы: сила тяжести и выталкивающая сила Архимеда, условие равновесия поплавка описывается выражением

$$F_A = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{пчт}}, \quad (1)$$

где F_A - выталкивающая сила Архимеда, Н; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости (воды), кг/м³; $V_{\text{пчт}}$ - объем погруженной части поплавка, м³; g - ускорение свободного падения, м/с².

Так как на поплавок действует только две силы: выталкивающая сила Архимеда F_A и сила тяжести поплавка mg , имеет место равенство:

$$F_A = mg. \quad (2)$$

Формула (1) с учетом равенства (2) получает вид

$$mg = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{пчт}}.$$

Отсюда получаем формулу для вычисления объема погруженной части поплавка $V_{\text{пчт}}$ в виде

$$V_{\text{пчт}} = \frac{m}{\rho_{\text{ж}}},$$

где m - масса поплавка, значение которой равно 3,150 кг; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости (воды), значение которой принято равным 1000 кг/м³.

Значение объема погруженной части поплавка $V_{\text{пчт}}$ с учетом вышеуказанных данных равно:

$$V_{\text{жж}} = \frac{\pi \cdot h}{\rho_{\text{ж}}} = \frac{3,150}{1000} = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Поплавок имеет цилиндрическую форму и, следовательно, объём погруженной части поплавка $V_{\text{пчт}}$ можно вычислить по формуле

$$V_{\text{пчт}} = \pi \frac{D^2 \cdot l}{4}, \quad (3)$$

где $\pi=3,1415926$; l - глубина погружения поплавка; D - наружный диаметр поплавка.

В соответствии с формулой (3) значение глубины погружения поплавка (без учета выталкивающей силы воздуха) l_1 при значении диаметра поплавка D , равном 400 мм, равно:

$$l_1 = \frac{4 \cdot V_{\text{жж}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2} = 0,02506690396 \text{ м}$$

или

$$l_1 = 25,06690396 \text{ мм.}$$

Далее, приведем расчет глубины погружения поплавка с учетом выталкивающей силы воздуха. При этом, значение плотности воздуха при нормальных условиях равна $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Полный объём поплавка V вычисляется по формуле

$$V = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot h}{4}, \quad (4)$$

где D - диаметр поплавка; h - высота поплавка.

Значение величины V при исходных данных: $D=400 \text{ мм}$, $h=54 \text{ мм}$ в соответствии с формулой (4) равно:

$$V = \frac{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 54 \cdot 10^{-3}}{4} = 6,78584 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

В этом случае на поплавок действуют три силы: сила тяжести поплавка, выталкивающая сила жидкости и выталкивающая сила воздуха.

Условие равновесия поплавка описывается выражением

$$F_{\text{Ав}} + F_{\text{Аж}} = mg; \quad (5)$$

где $F_{\text{Ав}}$ - выталкивающая сила воздуха; $F_{\text{Аж}}$ - выталкивающая сила жидкости.

Величины $F_{\text{Ав}}$, $F_{\text{Аж}}$ вычисляются по формулам:

$$F_{\text{Аж}} = \rho_{\text{ж}} g V_{\text{пчт}}; \quad (6)$$

$$F_{\text{Ав}} = \rho_{\text{в}} g (V - V_{\text{пчт}}), \quad (7)$$

где, $\rho_{\text{в}}$ - плотность воздуха, кг/м^3 ; $\rho_{\text{ж}}$ - плотность жидкости, кг/м^3 ; $V_{\text{пчт}}$ - объём погруженной в жидкость части поплавка, вычисляемый по формуле (3), м^3 ; V - полный объём поплавка, вычисляемый по формуле (4), м^3 .

Подставим выражения (6), (7) в формулу (5), получим условие равновесия поплавка в виде

$$mg = \rho_{\text{в}} g (V - V_{\text{пчт}}) + \rho_{\text{ж}} g V_{\text{пчт}};$$

или в окончательном виде

$$m = \rho_{\text{в}} (V - V_{\text{пчт}}) + \rho_{\text{ж}} V_{\text{пчт}}. \quad (8)$$

Подставим в уравнение (8) необходимые значения:

$$3,15 = 1,2 \cdot (6,7858344 \cdot 10^{-3} - V_{\text{пчт}}) + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,15 = 8,1430013 \cdot 10^{-3} - 1,29 \cdot V_{\text{пчт}} + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,141857 = 998,71 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$V_{\text{пчт}} = 3,1459152 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Высота части поплавка, погруженной в жидкость будет равна:

$$l_2 = \frac{4 \cdot V_{\text{пчт}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3,1459152 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 3,1459152 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (0,4)^2} = 0,02503439815 \text{ м} = 25,03439815 \text{ мм.}$$

Таким образом, разница высоты частей поплавка, погруженных в жидкость, с учетом выталкивающей силы воздуха и без неё равна:

$$\Delta l = l_1 - l_2 = 25,06690396 - 25,03439815 = 0,03250581 \text{ мм.}$$

Для определения максимального интервала изменения глубины погружения поплавка в жидкость рассмотрим несколько случаев. Исследовались максимально крайние точки условий работы эталона.

Приведем пример расчета глубины погружения поплавка при изменении относительной влажности воздуха на 50%.

При $t=20^\circ \text{ С}$ и атмосферном давлении 760 мм. рт. ст. $= 101\,325 \text{ Па} = 1013,25 \text{ гПа}$, плотность воздуха можно определить по формуле

$$\rho \approx \frac{0,348444 \cdot P - (0,00253 \cdot t - 0,002582) \cdot \varphi}{273,15 + t},$$

где P - атмосферное давление, гПа; t - температура воздуха, $^\circ \text{С}$; φ - относительная влажность воздуха, %.

При относительной влажности воздуха равной 100%, плотность воздуха будет равна:

$$\rho \approx \frac{0,348444 \cdot P - (0,00253 \cdot t - 0,002582) \cdot \varphi}{273,15 + t} = \frac{0,348444 \cdot 1013,25 - (0,00253 \cdot 20 - 0,002582) \cdot 100}{273,15 + 20} = \frac{353,06088 - 2,9818}{293,15} = 1,1941978 \text{ кг/м}^3$$

Объём погруженной части поплавка в жидкость по формуле (8) будет равен:

$$3,15 = 1,1941978 \cdot (6,7858344 \cdot 10^{-3} - V_{\text{пчт}}) + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,15 = 8,1036285 \cdot 10^{-3} - 1,1941978 \cdot V_{\text{пчт}} + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,1418964 = 998,8058 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$V_{\text{пчт}} = 3,1456529 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Высота части поплавка погруженной в жидкость при $t=20^\circ \text{ С}$, относительной влажности воздуха 100% и атмосферном давлении 760 мм. рт. ст. будет равна:

$$l_1' = \frac{4 \cdot V_{\text{пчт}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3,1456529 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 3,1456529 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (0,4)^2} = 0,02503212065 \text{ м}$$

или

$$25,03212065 \text{ мм.}$$

При относительной влажности воздуха равной 50%, плотность воздуха будет равна:

$$\rho \approx \frac{0,348444 \cdot P - (0,00253 \cdot t - 0,002582) \cdot \varphi}{273,15 + t} = \frac{0,348444 \cdot 1013,25 - (0,00253 \cdot 20 - 0,002582) \cdot 50}{273,15 + 20} = \frac{353,06088 - 1,4909}{293,15} = 1,1992836 \text{ кг/м}^3$$

Объём погруженной части поплавка в жидкость по формуле (8) будет равен:

$$3,15=1,1992836 \cdot (6,7858344 \cdot 10^{-3} - V_{\text{пчт}}) + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,15=8,1381399 \cdot 10^{-3} - 1,1992836 \cdot V_{\text{пчт}} + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,1418964=998,80072 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$V_{\text{пчт}}=3,1456344 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Высота части поплавка, погруженной в жидкость при $t=20^\circ \text{ С}$, относительной влажность воздуха 50% и атмосферном давлении 760 мм. рт. ст. будет равна:

$$l_2' = \frac{4 \cdot V_{\text{пчт}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3,1456344 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 3,1456344 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (0,4)^2} =$$

$$= 0,02503216362 \text{ м} = 25,03216362 \text{ мм}.$$

Таким образом, разница высот частей поплавка погруженных в жидкость при относительной влажность воздуха 100 % и относительной влажность воздуха 50% при прочих равных условиях будет равна:

$$\Delta l' = l_1' - l_2' = 25,03212065 - 25,03216362 =$$

$$= 0,0000429 \text{ м} = 4,29 \cdot 10^{-5} \text{ мм}.$$

Далее, приведем расчет глубины погружения поплавка при изменении атмосферного давления на 20 мм. рт. ст. и относительной влажности воздуха 50% при прочих равных условиях.

Плотность воздуха при атмосферном давлении равном 740 мм. рт. ст. = 98658,553 Па = 986,58553 гПа будет равна:

$$\rho \approx \frac{0,348444 \cdot P - (0,000282 \cdot t - 0,000282) \cdot P}{273,15 + t} =$$

$$= \frac{0,348444 \cdot 986,58553 - (0,000282 \cdot 20 - 0,000282) \cdot 986,58553}{273,15 + 20} =$$

$$= \frac{343,76981 - 1,4889}{293,15} = 1,1675897 \text{ кг/м}^3$$

Объём погруженной части поплавка в жидкость по формуле (8) будет равен:

$$3,15=1,1675897 \cdot (6,7858344 \cdot 10^{-3} - V_{\text{пчт}}) + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,15=7,9230704 \cdot 10^{-3} - 1,1675897 \cdot V_{\text{пчт}} + 1000 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$3,1420769=998,83241 \cdot V_{\text{пчт}};$$

$$V_{\text{пчт}}=3,1457498 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Высота части поплавка, погруженной в жидкость при $t=20^\circ \text{ С}$, относительной влажность воздуха 50% и атмосферном давлении 740 мм. рт. ст. будет равна:

$$l'' = \frac{4 \cdot V_{\text{пчт}}}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 3,1457498 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (400 \cdot 10^{-3})^2} = \frac{4 \cdot 3,1457498 \cdot 10^{-3}}{3,1415926 \cdot (0,4)^2} =$$

$$= 0,02503308194 \text{ м} = 25,03308194 \text{ мм}.$$

Таким образом, разница высот частей поплавка, погруженных в жидкость, при $t=20^\circ \text{ С}$, относительной влажность воздуха 50% и атмосферном давлении 760 мм. рт. ст. и при $t=20^\circ \text{ С}$, относительной влажность воздуха 50% и атмосферном давлении 740 мм. рт. ст. будет равна:

$$\Delta l'' = l_2' - l'' = 25,03216362 - 25,03308194 =$$

$$= 0,00091832 \text{ мм} = 9,1832 \cdot 10^{-4} \text{ мм}.$$

Закключение

Исходя из вышесказанного можно сделать вывод, что для Государственного специального эталона единицы длины (уровня) 1-го разряда в диапазоне 0,1-20 м с пределами допускаемой абсолютной погрешности $\pm 0,25$ мм, аттестованного по нормативным документам [6], влияние относительной влажности воздуха и атмосферного давления на точность измерения уровня незначительно.

Литература

- [1] Описание Государственного специального эталона единицы длины (уровня) в диапазоне 0,01-20 м / В. Ш. Биккулов, А. В. Кондаков, И. О. Гаранин, В. М. Мигранов. // Законодательная прикладная метрология, 2014. – № 2. – С. 9-11.
- [2] ГОСТ 8.321-78, Государственная система обеспечения единства измерений. Уровнемеры промышленного применения и поплавковые. Методы и средства поверки
- [3] Нефтегазохимический комплекс Российской Федерации: проблемы и перспективы развития / Ларионова Г.Н. // Вестник Казанского технологического университета, 2013. Т. 16. – № 12. – С. 225-228.
- [4] ГОСТ 2874-82 Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством
- [5] Weighing the right way with METTLER TOLEDO, 1993.
- [6] Организация процедур аттестации и утверждения эталонов единиц величин, используемых в сфере Государственного регулирования обеспечения единства измерений / Горюнова С.М., Хамраева Д.К., Сопин В.Ф. // Вестник Казанского технологического университета, 2012. Т. 15. – № 16. – С. 236-239.

© И. О. Гаранин – инж. НИО-7 ФГУП «ВНИИР», vniir.nio-7@yandex.ru; А. В. Кондаков - канд. хим. наук, нач. НИО-7 ФГУП «ВНИИР», доц. каф. аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ; В. Ш. Биккулов – инж. НИО-7 ФГУП «ВНИИР»; Л. Р. Рамазанова – магистрант каф. аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ.