

УДК 681.2

Е. С. ШАНЬГИН, Р. Ю. МУКАЕВ, М. А. ПУГИН

УРОВНЕМЕР ЖИДКИХ СРЕД С КОРРЕКЦИЕЙ  
ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В статье рассматривается конструкция датчика уровня, исключающая влияние температурной погрешности на измерение уровня жидкости. Приводится математическая модель расчета уровня жидкости в емкости. *Волновод; время прохождения; уровень жидкости*

## ВВЕДЕНИЕ

К устройствам для измерения количества топлива в транспортном средстве (уровнемеры и расходомеры) традиционно предъявляются повышенные требования. В тяжелых условиях эксплуатации, при больших изменениях температуры происходит изменение физических свойств жидкости (плотности, вязкости и т. п.), вплоть до кристаллизации ее компонентов и оседания их на частях измерительного оборудования (парафины, сера и т. д.), что снижает точность и надежность первичных преобразователей. Изменения температуры в большом диапазоне могут оказывать сильное влияние на работу вторичного электронного оборудования.

Существует широкая номенклатура средств контроля и измерения уровня, использующих различные физические эффекты [1]: емкостный, электроконтактный, гидростатического давления, поплавковый, ультразвуковой, радиоволновый и другие. Эти средства позволяют контролировать уровень различных сред: жидких, сыпучих. При выборе уровнемера необходимо принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или около него: давление, нагрев, охлаждение, способ заполнения или опорожнения (пневматический или механический), наличие мешалки, огнеопасность, взрывоопасность и другие.

На основе ультразвукового датчика [2, 3] авторами предложена конструкция, которая позволяет минимизировать температурную погрешность. Данная конструкция относится к области ультразвуковых измерений уровней, длин, перемещений и предназначена для использования в системах непрерывного контроля уровней жидких сред при изменениях температуры в широком диапазоне.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Устройство позволяет решить следующие задачи: повысить надежность и ресурс за счет исключения из конструкции подвижных частей; повысить точность измерений за счет уменьшения температурной погрешности, вызванной изменением температуры по ходу ультразвуковой волны при перепадах температуры жидкости, воздуха в непосредственной близости к поверхности жидкости и внешней среды.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ

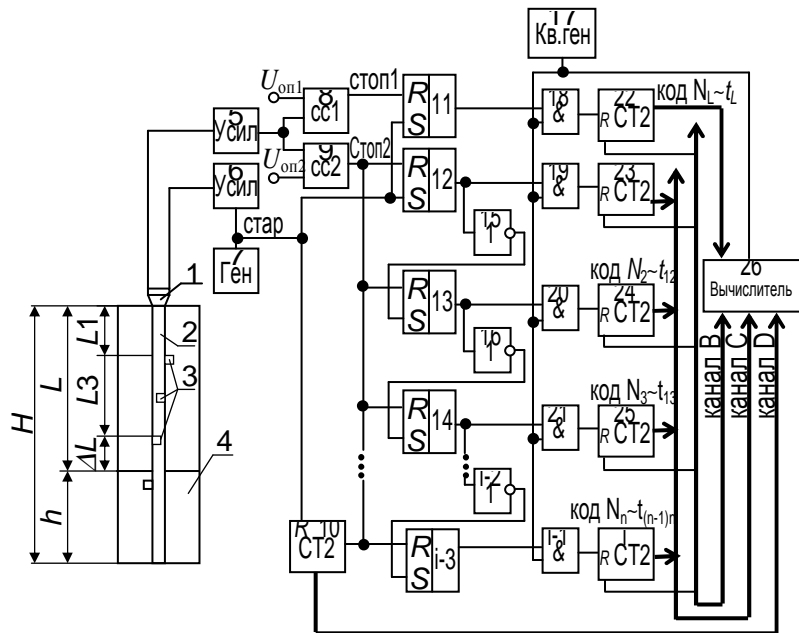
Ультразвуковой уровнемер работает следующим образом (конструкция представлена на рис. 1, временные диаграммы – на рис. 2). Генератор импульсов 7 формирует импульсы, период повторения которых равен

$$T_{\text{изм}} = \frac{L_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}, \quad (1)$$

где  $L_{\text{max}}$  – максимальное измеряемое расстояние;  $V_{\text{min}}$  – минимально возможная скорость ультразвуковой волны. Импульсы поступают на усилитель 6, соединенный со входом ультразвукового излучателя / приемника 1. Из-за неоднородности температуры в измеряемой емкости скорость УЗ-волны на разных участках измеряемого расстояния будет различной. Таким образом, для локального участка между выступами, находящегося на расстоянии  $(L_n - L_{n-1})$ , скорость ультразвуковой волны будет равна:

$$V_n = \frac{2(L_n - L_{n-1})}{t_n - t_{n-1}}, \quad (2)$$

где  $V_n$  – скорость УЗ-волны на  $n$ -м промежутке между выступами;  $L_n, L_{n-1}$  – расстояние от торца волновода до  $n$ -го и  $(n-1)$ -го выступа соответственно;  $t_n, t_{n-1}$  – время прохождения УЗ-волны между выступами  $n$  и  $n-1$  в прямом и обратном направлении соответственно.



**Рис. 1.** Конструкция ультразвукового уровнемера с излучением по воздуху: 1 – излучатель/приемник; 2 – волновод; 3 – выступы; 4 – измеряемая жидкость; 5, 6 – усилители; 7 – генератор импульсов; 8, 9 – первая и вторая схемы сравнения соответственно; 10 – двоичный счетчик адреса; 11 – RS-триггер сигнала от уровня жидкости; 12, 13, 14, ..., i-3 – RS-триггеры сигналов от выступов; 15, 16, ..., i-2 – инверсные повторители, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 17 – кварцевый генератор; 18 – ключ сигнала от уровня жидкости; 19, 20, 21, ..., i-1 – ключи сигналов от выступов, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 22, 23, 24, 25, ..., i-1 – двоичные счетчики; 26 – вычислитель

Уровень жидкости  $h$  определяется по формуле

$$h = H - L, \tag{3}$$

где  $H$  – высота емкости жидкости;  $L$  – расстояние от торца волновода до поверхности жидкости.

Расстояние  $L$  определяется по формуле

$$L = \Delta L + L_1 + L_{12} + L_{23} + \dots + L_{(k-1)k}, \tag{4}$$

где  $\Delta L$  – расстояние между поверхностью жидкости и ближайшим к нему выступом на волноводе.

$$L = \Delta L + \frac{t_1 \cdot V_1}{2} + \frac{t_{12} \cdot V_{12}}{2} + \frac{t_{23} \cdot V_{23}}{2} + \dots + \frac{t_{(k-1)k} \cdot V_{(k-1)k}}{2} = \Delta L + \sum_{j=1}^{i=k-1} \frac{t_{ij} \cdot V_{ij}}{2}, \tag{5}$$

где  $V_{ij}$  – локальные скорости ультразвуковой волны на участках по воздуху между  $i$ -м и  $j$ -м выступами;  $k$  – максимальный порядковый номер выступа;  $t_1$  – измеренное время прохождения УЗ-волны между торцом волновода и первым выступом в прямом и обратном направлении;  $t_{12}$  – измеренное время прохождения УЗ-

волны между 1-м и 2-м выступами в прямом и обратном направлении;  $t_{23}$  – измеренное время прохождения УЗ-волны между 2-м и 3-м выступами в прямом и обратном направлении;  $t_{ij}$  – измеренное время прохождения УЗ-волны между  $i$ -м и  $j$ -м выступами в прямом и обратном направлении.

$$\Delta L = V_n \cdot \frac{(t_L - t_n)}{2}. \tag{6}$$

Подставляя (2) в (6), получим

$$\Delta L = \frac{(L_n - L_{n-1}) \cdot (t_L - t_n)}{t_n - t_{n-1}}, \tag{7}$$

где  $t_L$  – время прохождения УЗ-волны от торца волновода до поверхности жидкости и обратно.

Подставляя (7) в (5), получим:

$$L = \frac{(L_n - L_{n-1}) \cdot (t_L - t_n)}{t_n - t_{n-1}} + \sum_{j=1}^{i=k-1} \frac{t_{ij} \cdot V_{ij}}{2}. \tag{8}$$

Таким образом, уровень жидкости  $h$  можно определить по формуле

$$h = H - \frac{(L_n - L_{n-1}) \cdot (t_L - t_n)}{t_n - t_{n-1}} - \sum_{j=1}^{i=k-1} \frac{t_{ij} \cdot V_{ij}}{2}. \tag{9}$$

Расстояние от торца волновода до  $n$ -го выступа  $L_n$  также можно представить как

$$L_n = \frac{H}{k+1} \cdot n, \quad (10)$$

тогда искомый уровень жидкости  $h$  после преобразований может быть найден как

$$h = H - L = H - (L_n + \Delta L) = H - H \cdot \frac{n}{k+1} - H \cdot \frac{t_L - t_n}{(k+1) \cdot (t_L - t_n)}, \quad (11)$$

где (в данном случае)  $L_n$  – расстояние от торца волновода до выступа с порядковым номером  $n$ , ближайшего к уровню жидкости.

Электронная схема ультразвукового уровнемера работает следующим образом. Генератор импульсов 7 формирует импульсы, поступающие на усилитель 6, одновременно на вход установки RS-триггеров 11, 12 поступает импульс начала счета «старт», также этим импульсами «старт» производится сброс двоичного счетчика адреса 10. Отразившийся от препятствия сигнал с выхода ультразвукового излучателя/приемника 1 поступает на усилитель 5, а затем на первую и вторую схемы сравнения 8 и 9; на вторые входы схем сравнения 8 и 9 поданы опорные напряжения сигнала от уровня жидкости и сигнала от выступов  $U_{1оп}$  и  $U_{2оп}$  соответственно ( $U_{1оп}$  и  $U_{2оп}$  определяются экспериментальным путем, в данной статье не рассматриваются). Таким образом первая схема сравнения 8 выделяет импульсы, соответствующие уровню жидкости, а вторая схема сравнения 9 – импульсы, соответствующие расстояниям до выступов. Сформированный импульс «стоп 1» с выхода первой схемы сравнения (8) поступает на вход сброса RS-триггера 11, тем самым формируя задний фронт импульса  $t_L$  (рис. 2), равного времени прохождения ультразвуковой волны от ультразвукового излучателя/приемника до уровня жидкости и обратно. Импульс  $t_L$  поступает на первый вход ключа 18, выполненного на логическом элементе «И», на второй вход которого поступают тактовые импульсы кварцевого генератора 17. Выход ключа соединен со счетным входом двоичного счетчика 22, на выходе которого формируется код  $N_L \sim t_L$  и передается по каналу А на вычислитель 26 для проведения дальнейшей обработки.

Со второй схемы сравнения (9) на входы сброса RS-триггеров 12–14,  $i - 3$  поступают импульсы расстояния до выступов «стоп 2». Сформированный импульс на выходе RS-триггера 12, через инвертирующий повторитель 15 поступает на вход установки RS-триггера 13,

на выходе которого при этом формируется передний фронт импульса  $t_{12}$ , задний фронт которого формирует импульс «стоп 2» от второго, по ходу ультразвуковой волны, выступа. Импульс  $t_{12}$  подается на первый вход ключа 19, на второй вход которого подаются тактовые импульсы кварцевого генератора 17. Двоичный счетчик 23 производит подсчет этих импульсов и на своем выходе формирует код  $N_1 \sim t_1$  и через общую шину со счетчиками 24, 25,  $i$  передает его на вход порта вычислителя 26 для дальнейшей обработки. Коды  $N_1 \sim t_1, N_2 \sim t_{12}, N_3 \sim t_{23}, \dots, N_n \sim t_{(n-1)n}$  формируются аналогично выше описанным и с двоичных счетчиков 24, 25,  $i$  через канал D передаются на вычислитель 26. Двоичный счетчик адреса 10 формирует код порядкового номера  $k$  локального промежутка  $t_{(n-1)n}$  и передает его на отдельный порт вычислителя 26.

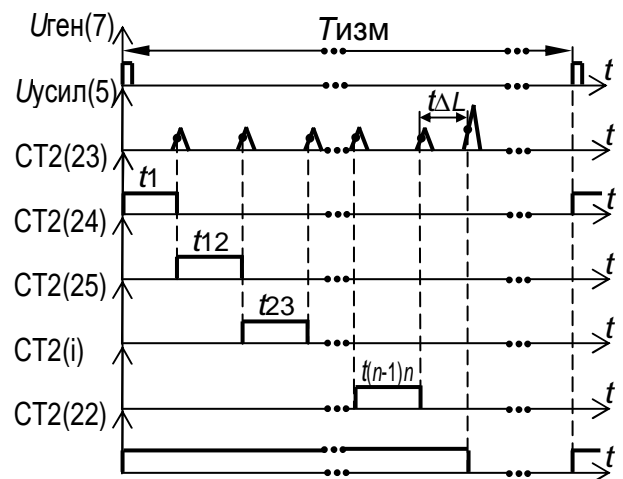


Рис. 2. Временная диаграмма работы электронной части уровнемера

Авторами также разработана конструкция, предусматривающая установку ультразвукового излучателя/приемника на торце волновода, погруженного в жидкость (рис. 3). Преимущество данной конструкции перед конструкцией рис. 1 в том, что ультразвуковая волна, излучаемая по жидкости, имеет сравнительно малый коэффициент затухания.

В данном случае, учитывая поправку  $a$  на геометрические размеры ультразвукового передатчика/приемника, искомый уровень  $h$  будет определяться так же, как в ультразвуковом уровнемере по пункту 1, и будет равен:

$$h = a + \sum_{i=0}^{j=k-1} \frac{t_{ij} \cdot V_{ij}}{2} - \frac{(b_n - b_{n-1}) \cdot (t_b - t_n)}{(t_n - t_{n-1})}, \quad (12)$$

где  $a$  – расстояние между дном емкости и торцом волновода;  $b_n, b_{n-1}$  – расстояние от торца волновода до  $n$ -го и  $(n-1)$ -го выступа соответственно;  $t_b$  – время прохождения УЗ-волны от торца волновода до поверхности жидкости и обратно.

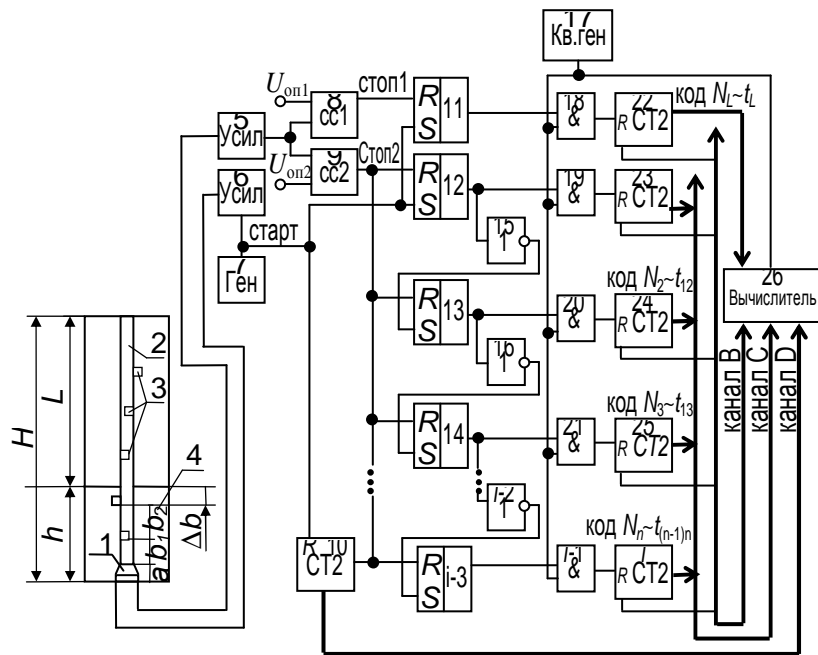
Данная конструкция может быть использована в резервуарах с постоянно высоким уровнем жидкости.

Авторами также разработана конструкция, предусматривающая установку ультразвуковых излучателей/приемников на двух торцах волновода, выходы ультразвуковых излучателей / приемников подключены к информационным входам ключа 27, управляющий вход ключа 27 соединен с одним из выходов вычислителя 26, также другой вход вычислителя 26 соединен с выходом генератора импульсов 7 (рис. 4). Данная конструкция отличается от конструкций по рис. 1 и рис. 2 высокой точностью измерения, так как излучение производится и в газовой

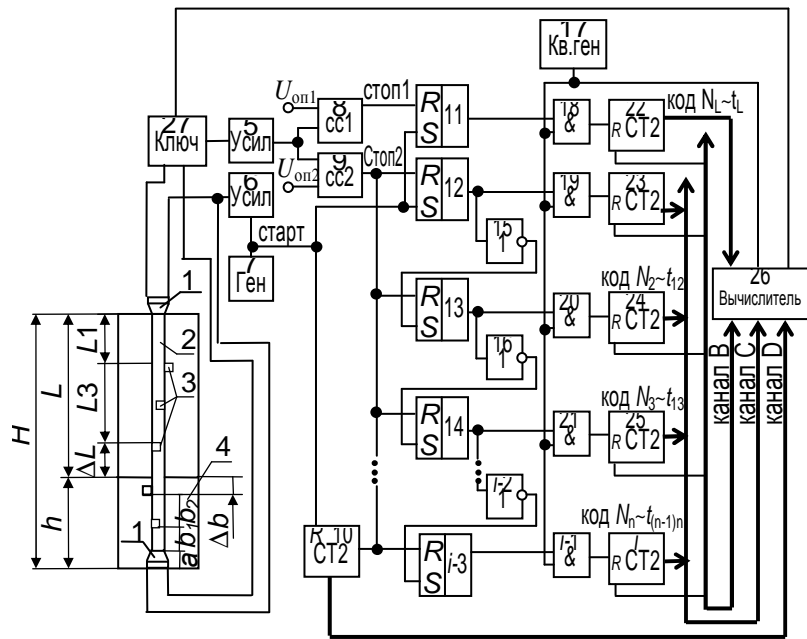
среде, и в жидкости. Данные измерений обрабатываются вычислителем 26 и усредняются.

Принцип работы представленной конструкции уровнемера отличается тем, что обработка информации с приемников производится поочередно, с помощью ключа 27, переключения канала измерения ключа 27 вычислителем 26, при приходе на его отдельный вход импульса начала измерения с генератора 7. Данная конструкция может быть использована для коммерческого учета жидкости.

Известно, что для любого газа основным фактором изменения скорости звука, а следовательно, увеличением погрешности уровнемеров, работающих на физических свойствах ультразвука, служит изменение температуры газа. В области температуры  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (или  $273\text{ K}$ ) относительное изменение скорости звука в нем составляет  $+1/546$  на каждый градус или  $+0,183\%$ -град $^{-1}$  [4].



**Рис. 3.** Конструкция уровнемера с установкой ультразвукового излучателя/приемника на торце волновода, погруженного в жидкость: 1 – излучатель/приемник; 2 – волновод; 3 – выступы; 4 – измеряемая жидкость; 5, 6 – усилители; 7 – генератор импульсов; 8, 9 – первая и вторая схемы сравнения соответственно; 10 – двоичный счетчик адреса; 11 – RS-триггер сигнала от уровня жидкости; 12, 13, 14, ...,  $i-3$  – RS-триггеры сигналов от выступов; 15, 16, ...,  $i-2$  – инверсные повторители, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 17 – кварцевый генератор; 18 – ключ сигнала от уровня жидкости; 19, 20, 21, ...,  $i-1$  – ключи сигналов от выступов, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 22, 23, 24, 25, ...,  $i-1$  – двоичные счетчики; 26 – вычислитель



**Рис. 4.** Конструкция уровнемера с установкой ультразвуковых излучателей/приемников на обоих торцах волновода: 1 – излучатель/приемник; 2 – волновод; 3 – выступы; 4 – измеряемая жидкость; 5, 6 – усилители; 7 – генератор импульсов; 8, 9 – первая и вторая схемы сравнения соответственно; 10 – двоичный счетчик адреса; 11 – RS-триггер сигнала от уровня жидкости; 12, 13, 14, ..., i-3 – RS-триггеры сигналов от выступов; 15, 16, ..., i-2 – инверсные повторители, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 17 – кварцевый генератор; 18 – ключ сигнала от уровня жидкости; 19, 20, 21, ..., i-1 – ключи сигналов от выступов, выполненные на логических элементах «ИЛИ-НЕ»; 22, 23, 24, 25, ..., i-1 – двоичные счетчики; 26 – вычислитель; 27 – ключ

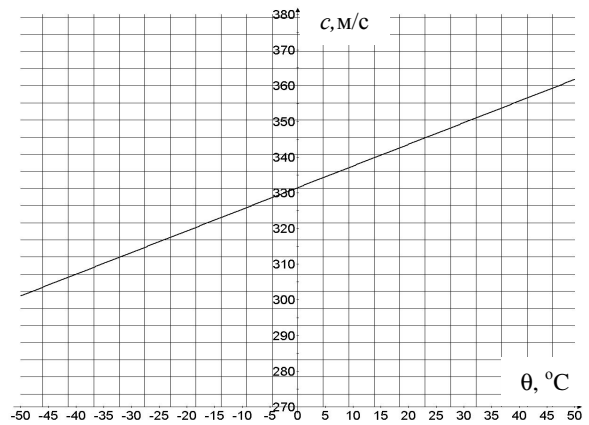
В частности, для сухого атмосферного воздуха при 0 °С и нормальном давлении  $P_0 = 10^5$  Па и  $\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> скорость звука, м/с, равна:

$$c = 20,067\sqrt{\theta_{абс}}, \quad (13)$$

или в первом приближении

$$c = 331,46(1 + \alpha_\theta\theta), \quad (14)$$

где  $\alpha_\theta \approx 1,83 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup> – температурный коэффициент скорости звука при 0 °С;  $\theta$  – температура по шкале Цельсия (рис. 5). Эти соотношения справедливы для звуковых волн, длина которых превышает длину свободного пробега молекул (примерно  $10^{-5}$  см), т. е. до частот  $10^8$  Гц, когда процесс распространения звука еще остается адиабатическим.



**Рис. 5.** Зависимость изменения скорости звука от температуры

### ВЫВОДЫ

Разработанные конструкции решают поставленные задачи:

- повышение точности измерений за счет исключения температурной погрешности, вызванной изменением температуры по ходу ультразвуковой волны при перепадах температуры жидкости, воздуха в непосредственной близости к поверхности жидкости и внешней среды;

- повышение надежности и ресурса за счет исключения из конструкции подвижных частей.

Разработанные конструкции уровнемера могут быть использованы в тяжелых условиях эксплуатации, имеют относительно малую стоимость и обладают высокой надежностью.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фрайден Дж.** Современные датчики. Справочник. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
2. **Мукаев Р. Ю., Пугин М. А.** Патент РФ № 2338162. Ультразвуковой уровнемер с температурной коррекцией.
3. Измерение в промышленности: Справ. Т. 2. Способы измерения и аппаратура / Под ред. П. Профоса. М.: Металлургия, 1990, 384 с.
4. **Горбатов А. А., Рудашевский Г. Е.** Акустические методы измерения расстояний и управления. М.: Энергоиздат, 1981. 208 с.

#### ОБ АВТОРАХ



**Шаньгин Евгений Сергеевич**, проф. каф. технич. кибернетики. Дипл. инж. элек. мех. (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по автоматизации и управлению техн. процессами (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. автоматике.



**Мукаев Роберт Юнусович**, доц. каф. инф.-изм. техники. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1980). Канд. техн. наук по автоматике (УГАТУ, 1994). Иссл. в области измерит. техники.



**Пугин Михаил Андреевич**, асп. каф. технич. кибернетики. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. уровнеметрии.