

АКУСТИЧЕСКИЙ УРОВНЕМЕР С ВЫСОКОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТЬЮ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЖИДКИХ СРЕД

Введение

Измерение и текущий контроль уровня жидких сред, по-прежнему, представляют актуальную проблему для решения ряда технологических задач, а также при их производстве, хранении и учёте. При этом к устройствам измерения уровня постоянно возрастают требования, как по снижению абсолютной погрешности, так и по увеличению разрешающей способности. Для достижения перечисленных целей применяются различные методы измерения уровня, в том числе и метод акустической локации.

В настоящее время для контроля уровня жидких сред применяются акустические уровнемеры различных производителей [1 – 4]. Общим для этих уровнемеров является использование сферической волны и применение высокочастотных акустических преобразователей, что ограничивает разрешающую способность в пределах нескольких миллиметров.

Низкочастотные модификации уровнемеров ЗОНД-3М [5 – 7], в которых используется плоская акустическая волна, обеспечивают разрешающую способность жидкости ± 1 мм при абсолютной погрешности $\pm(3...4)$ мм в своих рабочих диапазонах, что определяет перспективность их использования для решения широкого круга технологических и других задач. Однако в настоящее время для некоторых применений, например поддержания уровня масла в пределах $\pm(3...4)$ мм, разрешающей способности ± 1 мм может оказаться недостаточным. Поэтому целесообразно провести анализ максимально достижимой разрешающей способности низкочастотных модификаций уровнемера ЗОНД-3М с целью расширения возможных областей их использования.

В работе рассмотрены особенности функционирования приемо-передатчиков низкочастотных модификаций уровнемера ЗОНД-3М с плоской акустической волной, приведены оценка максимальной разрешающей способности и пути модернизации уровнемера для её достижения. Представлены результаты экспериментов, подтверждающих разрешающую способность менее 1 мм.

Основная часть

Принцип работы акустических уровнемеров локационного типа основывается на измерении временного интервала задержки отражённого сигнала и последующего расчета уровня до контролируемой поверхности. Использование плоской акустической волны определяет необходимость применения звуковода, размещаемого внутри резервуара с контролируемой жидкостью. Это, с одной стороны, ограничивает область применения жидкими не налипающими средами, а с другой – устраняет возможность образования пены и волнения на поверхности жидкости внутри звуковода.

Обобщенная структурная схема приемо-передатчиков представлена на рис.1. В ее состав входят управляющий процессор, излучатель акустического сигнала, первый и второй приемники, входные акустические устройства которых установлены на наружной стенке звуковода. В этом варианте реализуется относительный метод измерения временного интервала t_x задержки отражённого сигнала относительно плоскости установки входного устройства первого приемника. Участок звуковода между плоскостями установки первого и второго приёмников является эталонным, скорость распространения акустической волны на котором считается совпадающей со скоростью на участке звуковода между первым приёмником и поверхностью контролируемой среды [5]. Измеряемое расстояние R_i (рис.1) между плоскостью установки первого приемника и поверхностью жидкости, определяется выражением [4]:

$$R_i = R_x t_x / (t_1 + t_2), \quad (1)$$

где R_x – расстояние между приёмниками; t_x – временной интервал прохождения отражённого акустического сигнала в участке звуковода между плоскостью установки первого приёмника и поверхностью контролируемой среды; t_1 – временной интервал прохождения зондирующего акустического сигнала между плоскостями установки второго и первого приёмников; t_2 – временной интервал прохождения отражённого акустического сигнала между плоскостями установки первого и второго приёмников.

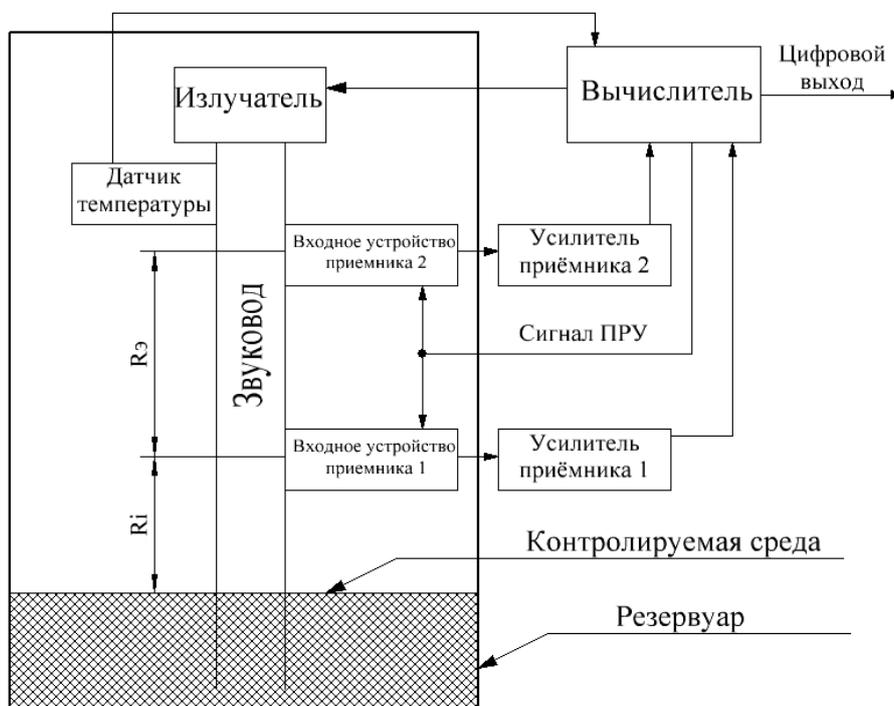


Рис.1

Если в состав приемо-передатчика вместо второго приёмника введен датчик температуры, то в нем реализуется абсолютный метод измерения расстояния R_i до контролируемой поверхности, которое определяется с помощью выражения [4]:

$$R_i = V_0 t_x (1 \pm t_i^{°C} / 546) / 2, \quad (2)$$

где V_0 – скорость акустической волны при 0°C , $t_i^{°C}$ – температура окружающей среды.

Оценка максимальной разрешающей способности приемо-передатчиков

В радиолокации под разрешающей способностью по дальности подразумевают минимальное расстояние между объектами, при котором они наблюдаются отдельно. В уровнемерах локационного типа источник отраженного сигнала один – поверхность контролируемого объекта. Поэтому под разрешающей способностью по уровню понимают минимально регистрируемое уровнем изменение уровня (расстояния) до поверхности контролируемого объекта.

В акустических уровнемерах локационного типа решение о приходе отраженного сигнала обычно принимают в момент превышения огибающей переднего фронта заданного порога $U_{\text{пор}}$ (рис.2). Это обусловлено использованием в них в качестве акустических преобразователей излучаемого и отраженного сигналов высокочастотных резонаторов.

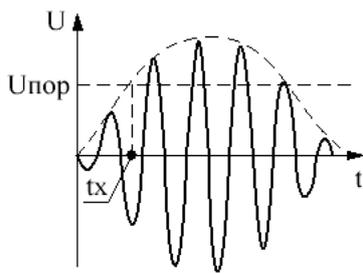


Рис.2

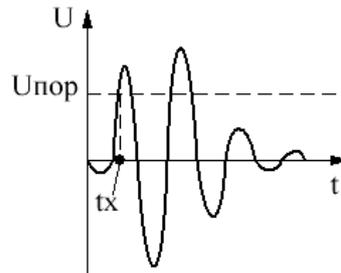


Рис.3

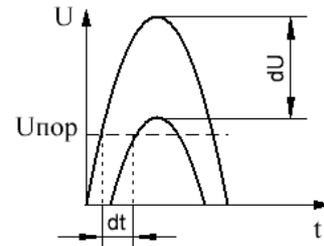


Рис.4

При неизменных параметрах среды распространения акустической волны внутри звуковода разрешающая способность будет зависеть от скорости возрастания переднего фронта огибающей, пределов изменения амплитуды отраженного сигнала в рабочем диапазоне уровнемера, нестабильности срабатывания порогового устройства и технических возможностей вычислителя (рис.1).

Чтобы увеличить разрешающую способность в приеме-передатчиках в качестве излучателя была применена высокочастотная электродинамическая головка, а в качестве входного устройства приемников – конденсаторный электретный микрофон. Электродинамическая головка в режиме излучения и конденсаторный микрофон (МКЭ) в режиме приёма характеризуются достаточно малой добротностью. Это обеспечило получение на выходе МКЭ импульсного сигнала с очень высокой крутизной огибающей. Данное обстоятельство позволило перейти к принятию однозначного решения о моментах прихода зондирующего и отраженных сигналов по превышению заданного порога передними фронтами первой положительной полуволны перечисленных сигналов (рис.3), что существенно увеличило разрешающую способность.

Следующим фактором, снижающим разрешающую способность, является изменение амплитуды отраженных сигналов в рабочем диапазоне контролируемых уровней. Действительно, уменьшение амплитуды принимаемого сигнала на величину dU при неизменном пороге $U_{пор}$ приводит к увеличению момента времени его прихода на величину dt (рис.4). Если принять, что при заданном $U_{пор}$ решение о моменте прихода сигнала может приниматься в диапазоне от $0,3$ до $0,7 U_{max}$, где U_{max} – амплитуда сигнала, то при рабочей частоте приемопередатчиков, составляющей около 2 кГц, неопределенность определения расстояния будет составлять примерно ± 3 мм.

Так как внутри звуковода имеет место только погонное затухание отраженного сигнала, то снижение амплитуды в рабочем диапазоне может быть минимизировано с помощью регулировки усиления приемников. Так, введение программной регулировки амплитуд сигналов, поступающих на входы приемников (см. сигнал ПРУ на рис.1), обеспечивает их практическую неизменность во всем рабочем диапазоне, что позволяет почти на порядок увеличить разрешающую способность, то есть до $\pm(0,3 \dots 0,4)$ мм.

Чтобы существенно снизить влияние нестабильности напряжения $U_{пор}$ срабатывания порогового устройства вычислителя, в приеме-передатчиках целесообразно применить специальную обработку, направленную на увеличение крутизны переднего фронта первой положительной полуволны импульсного сигнала (рис.3). Она заключается в детектировании входного сигнала с углом отсечки менее 90 градусов с последующим его усилением и ограничением. В результате такой обработки входные импульсные сигналы преобразовываются в последовательности $2 - 3$ прямоугольных видеоимпульсов, поступающих непосредственно на цифровой вход вычислителя (рис.1). В нем производятся измерение временных интервалов t_x, t_1, t_2 и расчёт текущего расстояния R_i , согласно выражениям (1) или (2), в зависимости от типа приемопередатчика.

Таким образом, технические решения, заложенные в приемо-передатчиках, могут обеспечивать (без применения усреднения результатов измерений) разрешающую способность до $\pm(0,3 - 0,4)$ мм. Реализованная в уровнемере ЗОНД-3М разрешающая способность ± 1 мм, по-видимому, ограничивается возможностями и собственным быстродействием применённого вычислителя. Поэтому для достижения разрешающей способности $\pm(0,3 \dots 0,4)$ мм, помимо доработки приемо-передатчиков, необходимо применить быстродействующий процессор.

Методика проведения и результаты испытаний

Для оценки реальной разрешающей способности была произведена модернизация приемо-передатчиков и программного обеспечения уровнемера на базе процессора, обеспечивающего аппаратную разрешающую способность не хуже $\pm 0,1$ мм. Испытания были проведены на уровнемере с приемо-передатчиком АП-7Э. В качестве образцов контролируемых жидких сред были выбраны слабо испаряющиеся жидкости – вода и дизельное топливо, так как акустические уровнемеры нецелесообразно использовать для контроля уровня легкоиспаряющихся жидкостей [8].

В процессе испытаний геометрическое расстояние от второго приемника (рис.1) до поверхности контролируемой жидкости оставалось неизменным. В этом случае исключается необходимость измерения геометрического расстояния до поверхности жидкости, а разброс текущих показаний R_i индикатора уровнемера может быть использован для оценки разрешающей способности:

$$\Delta R = \frac{R_{i \max} - R_{i \min}}{2}, \quad (3)$$

где $R_{i \max}$ и $R_{i \min}$ – соответственно максимальное и минимальное расстояния до поверхности жидкости, измеренные уровнемером.

Результаты испытаний, представленные на рис.5 и 6, свидетельствуют, что и для дизельного топлива (рис.5) и для воды (рис.6) разброс текущих значений расстояния ΔR не превышал $\pm 0,3$ мм. По осям ординат на рис.5 отложены отклонения расстояния до поверхности жидкостей относительно первого измерения, а по осям абсцисс – время проведения испытаний.

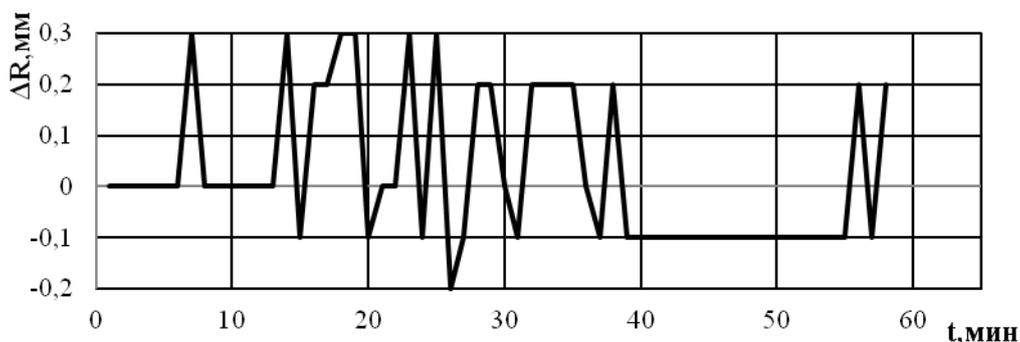


Рис. 5

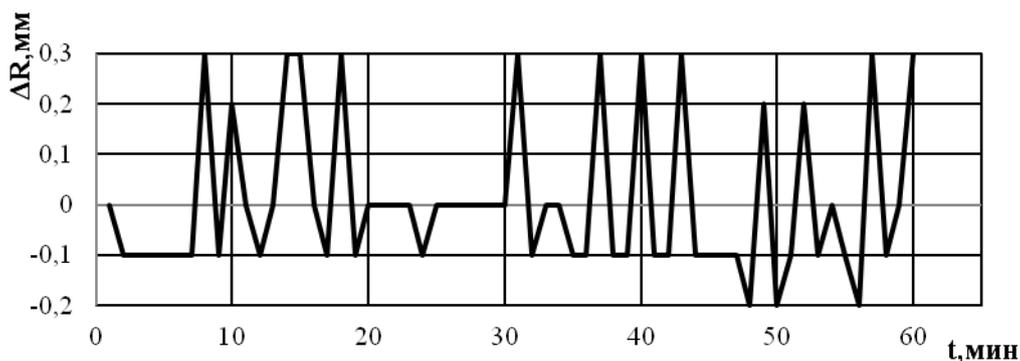


Рис. 6

Была также проведена оценка изменения расстояния, контролируемого уровнемером, при его дискретном уменьшении на 0,0; 0,3; 0,6 и 0,9 мм (рис.7). По оси ординат отложены отклонения текущего расстояния $\Delta R = R_i - R_1$ до поверхности воды относительно первого измерения, а по оси абсцисс – порядковый номер измерения. Данные на рис.7 показывают, что для каждой из четырех серий измерений разрешающая способность не превышала $\pm 0,3$ мм. При этом для первых трех серий измерений средние значения уменьшения расстояния, контролируемые уровнемером, были близки к геометрическому и составляли 0,3 мм, а в последней серии оно составило 0,21 мм.

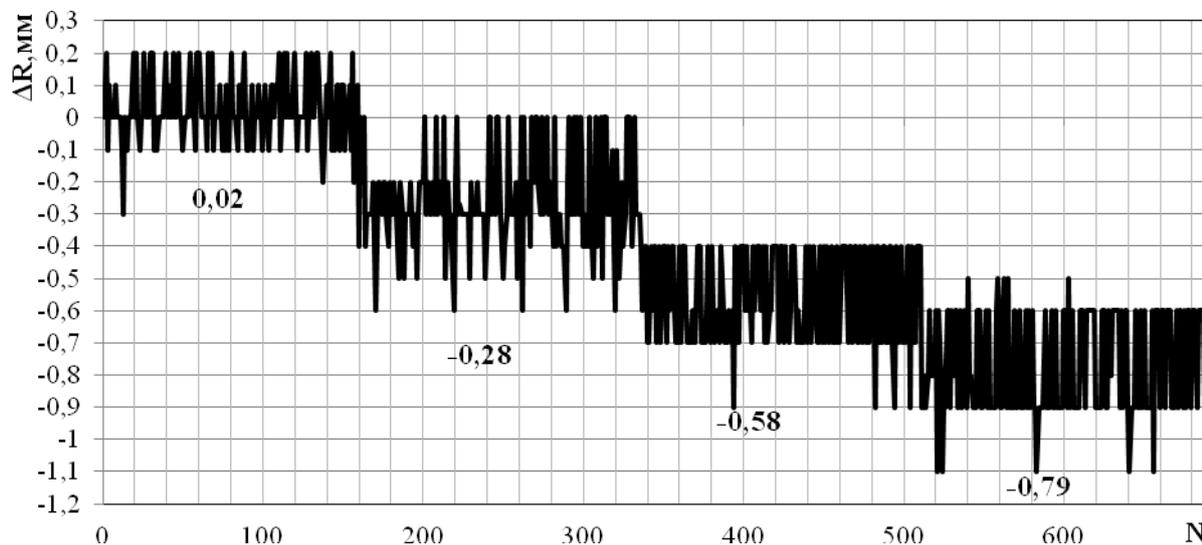


Рис. 7

Таким образом, результаты испытаний подтвердили, что уровнемер с плоской акустической волной обеспечивает разрешающую способность не более $\pm 0,3$ мм.

Для реализации разрешающей способности не более $\pm 0,3$ мм при использовании абсолютного метода к датчику температуры (рис.1) предъявляются следующие требования. Согласно выражению (1) он должен контролировать температуру внутри резервуара с погрешностью не более $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$ при рабочем диапазоне до 1 м и не более $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ при рабочем диапазоне до 10 м.

Помимо непосредственного использования для контроля уровня жидких сред, перспективным представляется создание на базе уровнемера ЗОНД-3М с приемо-передатчиком АП-7Т акустического расходомера для безнапорных лотков и трубопроводов [9]. Для расчета текущего расхода расходомер должен синхронно с высокой точностью измерять текущие уровень и скорость потока жидкости. Применение в уровнемере двух звуководов позволяет отдельно контролировать в первом звуководе уровень, соответствующий статическому давлению жидкости, а во втором – уровень, соответствующий полному динамическому давлению жидкости. В этом случае в первом звуководе будет определяться текущий уровень жидкости, а разность уровней в обоих звуководах позволит с высокой точностью определять текущую скорость потока жидкости.

Выводы

Результаты исследований подтверждают, что модернизированный уровнемер с плоской акустической волной может обеспечивать текущую разрешающую способность не более $\pm 0,3$ мм.

Уровеньмер с плоской акустической волной перспективен для создания на его базе расходомера для безнапорных лотков и трубопроводов.

Список литературы: 1. *Жданкин В.* Ультразвуковые датчики для систем управления // СТА – 2003 – №1 – С.68 – 79. 2. <http://www.geolink.ru/pdf/eh/fmu40.pdf>-23.05.2013. 3. http://www.vzljot.ru/files/docs/84/re_ur2xx.pdf- 23.05.2013. 4. *Жуков Б.В., Солярский Н.Ф.* и др. Акустический уровнемер «ЗОНД-3М» // Датчики и системы. – 2007. – № 2. – С.35 – 40. 5. *Жуков Б.В., Солярский Н.Ф.* и др. Низкочастотные модификации акустических преобразователей акустического уровнемера “ЗОНД-3М” // Датчики и системы. – 2007. – №3. – С.42 – 46. 6. *Пат. Украины* на пол. модель №2552 G01F 23/28. Устройство для измерения уровня жидкости // Бюл. – 2004 – №6. 7. *Пат. РФ* 2146358 G01F 23/296. Устройство для измерения уровня жидких сред // Бюл. – 2000 – №7. 8. *Жуков Б.В., Одновол А.В.* Контроль уровня легкоиспаряющихся жидкостей методом акустической локации // Радиотехника. – 2012. – Вып.171. – С.239 – 244. 9. *Пристрій* для вимірювання об’ємної витрати рідини у відкритих каналах і закритих трубопроводах без напору // Заявка на Пат. України на кор. модель. № а201215032 G01F 1/66 від 27.12.2012р.

*Институт радиофизики и электроники
НАН Украины*

Поступила в редколлегию 22.02.2013