

# Прецизионные ультразвуковые измерители уровня жидкости в закрытых резервуарах

Богушевич В. К., научный сотрудник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

Замаренова Л. Н., научный сотрудник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua) / [zamarenova.l@gmail.com](mailto:zamarenova.l@gmail.com)

Котов Г. М., ведущий инженер

e-mail [glebmih@gmail.com](mailto:glebmih@gmail.com)

Скипа М. И., к.т.н., старший научный сотрудник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

Государственное учреждение “Отделение гидроакустики Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины”

Одесса, Украина

**Аннотация**—Рассматриваются вопросы измерения уровня жидкости в стальных резервуарах через стенку. При измерениях уровня по времени распространения сигнала лучшая точность достигается при его корреляционно-фазовом приеме. Но прохождение сигнала через упругую стенку приводит к искажениям его фазовой структуры, что ухудшает корреляционно-фазовый прием. Целью работы является определение возможностей выбора сигналов, искажения фазы которых при прохождении через упругую стенку будут малы. Предложена схема расчетов прохождения сигнала через упругую стенку (и построения ее амплитудно- и фазочастотных характеристик), учитывающая продольные и сдвиговые волны ее толщинных колебаний и стоячие волны резонансных колебаний по длине (диаметру); предложен способ выбора частот зондирующего сигнала в соответствии с характеристиками стенки. При измерении через тонкое, 0,8 мм, дно при частоте сигнала 250-750 кГц и отношении сигнал/шум 0,4 получена точность времени  $\sim 0,15$  мкс, соответствующая точности уровня  $\sim 0,1$  мм. Показано, что такая точность должна обеспечиваться в интервале толщин дна 0,3-3,6 мм.

Библ. 20, табл. 1, рис. 7.

**Ключевые слова** — измерение уровня через стенку, распространение звука, корреляционно-фазовый прием, искажения фазы сигнала.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Существует много задач, в которых требуется измерять уровень жидкости и ее характеристики в закрытых резервуарах. Жидкостями могут быть нефтепродукты, вредные и опасные химические вещества, любые вещества в герметичных контейнерах. Резервуары тоже могут быть самыми разнообразными – от танков нефтехранилищ, авто- и железнодорожных цистерн, технологических реакторов и трубопроводов до бочек и емкостей малого размера. Материалом резервуаров чаще всего бывает сталь. При измерениях в закрытых резервуарах альтернативы ультразвуковым устройствам, работающим “через стенку”, практически не существует.

Измерение характеристик жидкостей – скорость звука  $c_F$ , плотность  $\rho_F$  и поглощение  $\alpha_F(f)$  – с достаточно высокой точностью и при известной температуре  $T$  позволяет решать задачи их идентификации, в том числе идентифицировать углеводороды. Анализ характеристик разных жидкостей [1, 2] показывает, что абсолютно большая часть из них может быть идентифицирована при измерении их характеристик

с точностью  $\Delta c = 0,4-0,5$  % ( $\sim 5$  м/с),  $\Delta \rho = 1$  % ( $\sim 8$  кг/м<sup>3</sup>) и  $\Delta \alpha \sim 20$  %. Точность измерения уровня  $h_F$  определяется как задачами технологических процессов, так и задачами контроля количества веществ. Так, при точности измерения уровня 3 мм точность измерения объема жидкости в 60-тонной железнодорожной цистерне составит  $\sim 50$  л.

### A. Методы измерений

При измерениях уровня и характеристик жидкостей чаще всего используется их связь с частотной (интерферометрические методы) или с временной (временноразрывные методы) характеристиками распространения звука. Из интерферометрических методов [2-5] чаще используется метод акустической интерферометрии качающейся частоты (SFAI) [2, 4, 5]. Для реализации метода на дно (стенку) резервуара устанавливаются рядом два пьезоакустических преобразователя, передающий и приемный. На первый преобразователь подается непрерывный сигнал с плавно изменяющейся (качающейся) частотой, а со второго снимают сигнал, представляющий собой суперпозицию максимумов и минимумов, связанных



с акустическими резонансами по длине слоя жидкости  $L_F$  или  $h_F$  и по толщине стенки  $h_c$ , – спектральный отклик системы стенка–слой жидкости на вводимый сигнал. Скорость звука  $c_F$  и уровень  $h_F$  определяются [4, 5] по интервалу частот  $\Delta f$  между соседними резонансными пиками, связанными с жидкостью,  $c_F = 2L_F \Delta f_1$ ,  $h_F = c_F / 2\Delta f_2$ . Толщина  $h_c$  при этом определяется по скорости звука в материале стенки  $c_c$  и интервалу частот  $\Delta F$  между широкими пиками, связанными с резонансами в стенке –  $h_c = c_c / 2\Delta F$ . Отношение максимума и минимума амплитудно-частотной зависимости на низких частотах (когда  $f \rightarrow 0$  и  $\alpha_F(f) \rightarrow 0$ ) определяет отношение импедансов материала стенки и жидкости [4, 5], что позволяет по известным  $c_c$ ,  $\rho_c$  и  $c_F$  найти  $\rho_F$ , а ширина полосы резонансных пиков  $\delta f$  определяет коэффициент затухания на этих резонансных частотах. Интерферометрические методы имеют очень высокую точность измерения характеристик. Но такая точность достигается при большом времени измерений (пропорциональном толщине слоя жидкости). Практическое применение эти методы находят при точных измерениях в трубках, трубах и резервуарах небольших размеров. Однако для оперативных (не более двух минут) измерений характеристик жидкостей в железнодорожных цистернах они не подходят.

Времяимпульсные (в англоязычной литературе времяпролетные, TOF) методы тоже позволяют измерять в закрытых резервуарах характеристики жидкостей  $c_F$ ,  $h_F$ ,  $\rho_F$  и  $\alpha_F(f)$  [6-8]. Измерение скорости звука в жидкости  $c_F$  (при известном поперечном размере резервуара) и ее уровня  $h_F$  (при измеренном значении скорости звука) производится с помощью одного приемопередаточного преобразователя по измеряемому времени распространения сигнала в жидкости  $t_F$ . Для измерения плотности жидкости используется процесс переотражения короткого импульса в стенке резервуара [7, 8]. Плотность жидкости и ее импеданс определяют коэффициент отражения на границе стенка–жидкость и соотношение амплитуд последовательности переотраженных в стенке импульсов. Это позволяет по известным значениям  $c_c$ ,  $\rho_c$  и  $c_F$  определять импеданс жидкости и ее плотность  $\rho_F$ . Для измерения  $\alpha_F(f)$  можно использовать подход [6], при котором для зондирования используются широкополосные сигналы и их корреляционный прием, осуществляется преобразование Фурье корреляционных пиков первого и второго отраженных сигналов и деление спектра второго сигнала на спектр первого. Времяпролетные методы сопоставимы с интерферометрическими по точности, но требуют меньшего времени и незаменимы при оперативных измерениях. Их и будем рассматривать в дальнейшем.

#### *В. Измерение уровня жидкости в железнодорожных цистернах*

Задачи измерения в закрытых резервуарах характеристик жидкостей и их идентификации ставятся редко. Значительно чаще рассматриваются задачи измерения уровня жидкости, в том числе в железнодорожных цистернах.

Известные нам уровнемеры украинского, российского и американского производства используют простые сигналы и неоптимальные методы приема. Так, уровнемер УУП1-П1 [9] использует для зондирования радиоимпульс с несколькими периодами частоты заполнения. Эта частота изменяется и настраивается на частоту звукопрозрачности дна емкости (одна из частот толщинных резонансов). Использование частот звукопрозрачности позволяет увеличить уровень прохождения сигнала через дно [10]. Но из-за увеличения на резонансной частоте времени нарастания и спада принимаемого сигнала будет ухудшаться точность измерения времени распространения. Уровнемер УЗУ-2 [11] использует сигнал длительностью  $T_c \sim 50$  мкс, с частотой, соответствующей частоте звукопрозрачности стенки,  $f_c \sim 350$  кГц. Уровнемер ТДС 1000 [12] использует радиоимпульс с изменяемыми частотой заполнения и числом периодов (до 31). Уровнемер АУЗУР-02 [13] для зондирования использует радиоимпульс с задаваемой длительностью (до 128 мкс) и прием по огибающей. По идеологии формирования и обработки сигналов эти уровнемеры подобны и имеют близкие показатели точности, не лучше 5-10 мм. Уровнемер ANALIQ [14] использует для зондирования короткий импульс (с широким спектром частот). Стенка цистерны фильтрует этот спектр на частотах толщинных резонансов, а среда распространения ослабляет (из-за поглощения) верхние частоты спектра – это приводит к уменьшению крутизны переднего фронта импульса и точности измерений.

Использование методов корреляционно-фазового приема сложных сигналов [6] могло бы значительно повысить точность измерений. Но такие методы для измерения уровня в стальных резервуарах обычно не используются. Причиной тому являются особенности прохождения звука через упругие оболочки. Прохождение импульсного сигнала с широкой полосой частот через стальную стенку, имеющую в этой полосе множество резонансов, будет приводить к искажениям фазовой структуры сигнала. А корреляционно-фазовый прием требует малости искажений фазовой структуры принимаемого сигнала. В такой ситуации успешность применения корреляционно-фазового приема будет определяться возможностью выбора зондирующего сигнала, искажения фазовой структуры которого при прохождении через стенку будут малы. Решать эту задачу предлагается путем выбора частот зондирующего сигнала в соответствии с амплитудно- и фазочастотными характеристиками упругой стенки.

Целью работы является определение возможностей применения корреляционно-фазового приема и достигаемых точностей измерения уровня в условиях различных стальных резервуаров. Далее будут рассмотрены вопросы измерения уровня при прохождении звука через тонкое, 0,8 мм, дно бочки, толстую (14 мм) стальную пластину, при измерении уровня в баке через толстое (20 мм) дно и толстую (9 мм) боковую стенку, толстую (9 мм) стенку железнодорожной цистерны.



## II. ПРЕЦИЗИОННОЕ ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

### A. Точность измерения уровня жидкости и скорости звука

При использовании времяпролетных методов уровень жидкости (расстояние) определяется по измеряемому времени распространения сигнала  $t_F$  и значению скорости звука в жидкости  $c_F$ ,  $l_F = c_F t_F$ . При этом стандартная ошибка вычисления расстояния  $\sigma_l$  (среднеквадратическое отклонение) определяется ошибками времени распространения сигнала  $\sigma_t$  и скорости звука  $\sigma_c$  и при двухстороннем распространении,  $t_F = 2l_F/c_F$ , будет определяться [15]:

$$\sigma_l = [(c \sigma_t / 2)^2 + (l \sigma_c / c)^2]^{1/2}. \quad (1)$$

Согласно (1) при малых  $l_F$  точность  $\sigma_l$  в первую очередь определяется точностью измерения времени  $\sigma_t$ . С увеличением  $l_F$  вклад второго слагаемого увеличивается и при  $l_F \gtrsim 1,2$  м ( $\sigma_t \sim 1,5$  мкс,  $\sigma_c \sim 1$  м/с,  $c \sim 1250$  м/с) точность  $\sigma_l$  будет, в первую очередь, определяться точностью  $\sigma_c$ .

Значение скорости звука можно измерять или задавать по таблицам для известных жидкостей при измеряемых значениях температуры. Для нефтепродуктов изменение скорости звука с температурой определяется температурным коэффициентом  $\Delta c / \Delta T = (3,7-4,7)$  (м/с)/°С. При измерении температуры серийным датчиком ТСМ со стандартной ошибкой  $\sigma_T = 0,2$  °С [15] ошибка определения скорости звука составит  $\sigma_c = 0,74-0,94$  м/с, что при  $l_F = 3,0$  м приводит к ошибке измерения расстояния  $\sigma_l = 1,8-2,3$  мм.

Для неизвестной жидкости значение скорости звука нужно измерять. Для этого надо использовать распространение звука по диаметру цистерны, который считается известным или измеряемым. При этом ошибка измерения скорости  $c = l/t$  определяется ошибкой измерения времени распространения  $\sigma_t$  и ошибкой задания расстояния  $\sigma_l$ :

$$\sigma_c = [(c \sigma_t / 2t)^2 + (c \sigma_l / l)^2]^{1/2}. \quad (2)$$

При увеличении расстояния  $l$  ошибка измерения скорости (2) уменьшается как за счет уменьшения  $\sigma_l/l$ , так и за счет уменьшения  $\sigma_t/t$ , и в случае железнодорожной цистерны  $D = 3,0$  м при  $\sigma_l = 2$  мм может составить  $\sigma_c \sim 1,0$  м/с (при  $\sigma_t \sim 1,5$  мкс). Однако такую точность измерения времени распространения в жидкости  $t_l$  через стенку цистерны ( $2t = 2t_l + 2t_c$ ) получить весьма непросто. Толщина стенки  $b_c$  и скорость звука в металле  $c_c$  не всегда известны точно, что не позволяет точно определить  $t_l$ . Кардинально решить вопрос точности измерения  $t_l$  можно при использовании разностного подхода, при котором измеряется время не между излученным и первым отраженным сигналами, соответствующее распространению и в металле и в жидкости, а время между первым и вторым отраженными сигналами, соответствующее распространению только в жидкости.

Если диаметр цистерны известен (или измеряется) с высокой точностью, то точность измерения уровня

можно повысить, используя времяотносительный подход. При таком подходе уровень жидкости определяется внутренним диаметром цистерны и временем распространения сигнала в жидкости по ее диаметру  $t_l$  и по вертикали  $t_h$ :  $h = D t_h / t_l$ . Точность измерений уровня  $h$  в этом случае определяется только точностью измерения времени  $\sigma_t$  и диаметра цистерны  $\sigma_l$  и может достигать  $\sigma_h = 1-2$  мм за одно зондирование.

### B. Точность измерения времени. Зондирующие сигналы

В задачах акустической томографии для точного определения времени распространения по лучу используют широкополосные сигналы и вычисление функции взаимной корреляции принятого и излученного сигналов [16]. Ширина пика (огibaющей) взаимной корреляции составляет величину  $\Delta \tau_p = 1/F_s$  – временное разрешение измерительной системы, где  $F_s$  – эффективное значение полосы частот сигнала. Точность измерения времени прихода сигнала (среднеквадратическое отклонение) определяется временным разрешением и отношением уровней сигнала и шума:

$$\sigma_t = \Delta \tau_p / (u_c / u_{ш}) = 1 / F_s (u_c / u_{ш}). \quad (3)$$

В реальных условиях точность измерения времени ограничивается микролучевостью распространения [16]. Но если разница времени прихода по микролучам достаточно мала, меньше чем  $1/2\pi f$ , то фазовую структуру сигнала можно считать неизменной и можно использовать методы приема “с точностью до фазы”. В случае такого фазового приема сигнала ошибка измерения времени будет значительно меньше:

$$\sigma_t = 1/2\pi f (u_c / u_{ш}). \quad (4)$$

Уменьшение ошибки в этом случае будет определяться отношением  $2\pi f / F_s$ , что при соотношениях между полосой частот сигнала и его средней частотой  $F_s/f \sim 0,5-1,0$  будет давать увеличение точности в 6-12 раз.

Использование в ультразвуковых уровнемерах широкополосных сигналов с большой базой  $B = 2F_c T \gg 1$  и их корреляционный прием дают значительные преимущества [17]. Из этих преимуществ отметим возможность увеличения отношения сигнал/шум за счет увеличения длительности сигнала, высокую помехоустойчивость, обеспечиваемую эффектом декорреляции помехи, высокое временное разрешение, определяемое полосой сигнала (или его частотой), и высокую энергетическую эффективность. При корреляционном приеме широкополосный сигнал сжимается в короткий импульс длительностью  $1/F_c$  и происходит улучшение отношения сигнал/шум (в  $B$  раз по мощности). При корреляционно-фазовом приеме широкополосного сигнала достигается максимальная точность измерения времени – малые доли периода сигнала (4).

При выборе характеристик зондирующего сигнала уровнемера частота и полоса частот должны быть максимально большими (3), (4). Они



ограничиваются потерями на поглощение в среде распространения и могут достигать значений  $f_c=500$  кГц,  $F_c=500$  кГц. Длительность сигнала  $T_c$  тоже должна быть максимально большой, что увеличивает отношение сигнал/шум и точность измерения времени. Ограничением для длительности является уровень углеводорода в цистерне; при  $h=1,5$  м длительность может превышать 2,0 мс, а база сигнала – значение  $B=2000$ . В случае измерения уровня подтоварной воды (при значениях уровня 3-5 см) длительность сигнала не должна превышать 40-65 мкс, и получить большую базу не представляется возможным. Но задачи измерения уровня нефтепродукта,  $h_1=1,5-3,0$  м, и уровня подтоварной воды,  $h_2=3-5$  см, существенно различны и решать их нужно отдельно, используя разные сигналы, излучаемые поочередно.

### III. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ ДНО ТОНКОСТЕННОЙ БОЧКИ

#### A. Аппаратура и схема эксперимента

Экспериментальные работы проводились на стальной бочке (1) объемом  $V=216$  л, с размерами  $H=87$  см,  $D=56$  см и с толщиной стенки  $b_c=0,8$  мм, заполненной водой (2), рис. 1. Префоизлучающие пьезоакустические преобразователи (3) – V 101-RB фирмы OLYMPUS, их частотная характеристика приведена на рис. 2, генератор (4) – двухканальный цифровой генератор сигналов произвольной формы AG2052F фирмы OWON, усилитель мощности (5) – усилитель APEX PA107DP. Диодный коммутатор (6) стандартный, с парой проходных и парой шунтирующих диодов, в качестве АЦП (7) использовался 4-канальный 12-разрядный преобразователь E20-10 фирмы L-CARD с частотой преобразования  $f_0=10$  МГц и USB выходом. Первый канал генератора (4) обеспечивал формирование зондирующего сигнала и работал в импульсном режиме, второй канал обеспечивал формирование шумов и помех и работал в непрерывном режиме. Отраженные от поверхности сигналы через коммутатор (6) и АЦП (7) поступали в ноутбук (8), где производилась их запись и последующая обработка. Вычислялись функции знаковой (фазовой) и амплитудной корреляции принимаемого и опорного (знаковая функция излученного) сигналов.

При вычислении знаковой корреляции уровень шумов стабилен. Это позволяет легко выделять (при постоянном пороге) пик корреляции, определяющий момент прихода сигнала. Но в силу нелинейности этой операции при малых отношениях сигнал/шум (ОСШ) происходит подавление сигнала шумом, и уровень корреляционного пика падает. При вычислении амплитудной корреляции (линейная операция) подавления слабого сигнала шумом не происходит. Но в этом случае надо решать вопросы анализа уровня шумов и задания порога. Поэтому в большинстве случаев целесообразно вычислять и амплитудную, и фазовую корреляционные функции, что

позволяет повысить как точность, так и достоверность приема сигнала.

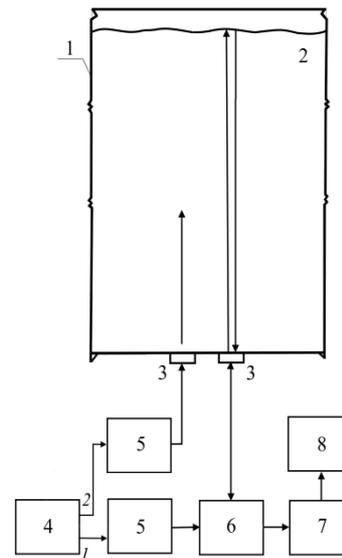


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – бочка; 2 – жидкость; 3 – преобразователи; 4 – генератор сигналов; 5 – усилитель мощности; 6 – диодный коммутатор; 7 – АЦП; 8 – ноутбук.

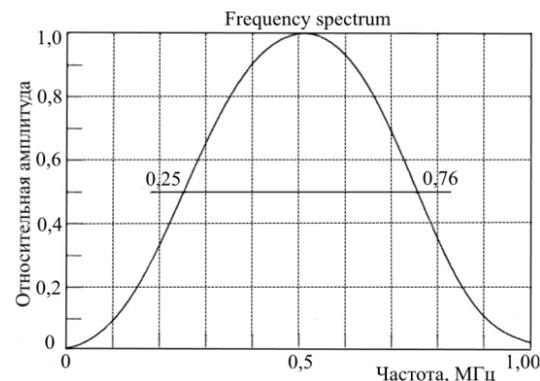


Рис. 2. Частотная характеристика преобразователя.

#### B. Используемые сигналы

При проведении работ по измерению уровня жидкости использовались два сигнала,  $S_1$  и  $S_2$ . Сигнал  $S_1$  – это ЛЧМ-сигнал длительностью  $T_c=204,8$  мкс с изменением частоты от  $f_n=270$  кГц до  $f_e=730$  кГц, значением полосы частот  $F_c=460$  кГц и постоянной амплитудой (рис. 3а). При прохождении такого сигнала через дно бочки и жидкость (по два раза) принимаемый сигнал (первый отраженный) характеризовался большими изменениями уровня (рис. 3в). Такие изменения уровня определяются амплитудно-частотной характеристикой префоизлучающего преобразователя (рис. 2) и частотной зависимостью ослабления звука при прохождении через стальную стенку [10]. Большая изменчивость уровня сигнала (рис. 3в) приводит к уменьшению эффективной длительности сигнала  $T_{эф}$ , эффективной полосы его частот  $F_{эф}$ , базы сигнала  $B=2F_{эф} T_{эф}$  и ухудшает его корреляционные свойства.

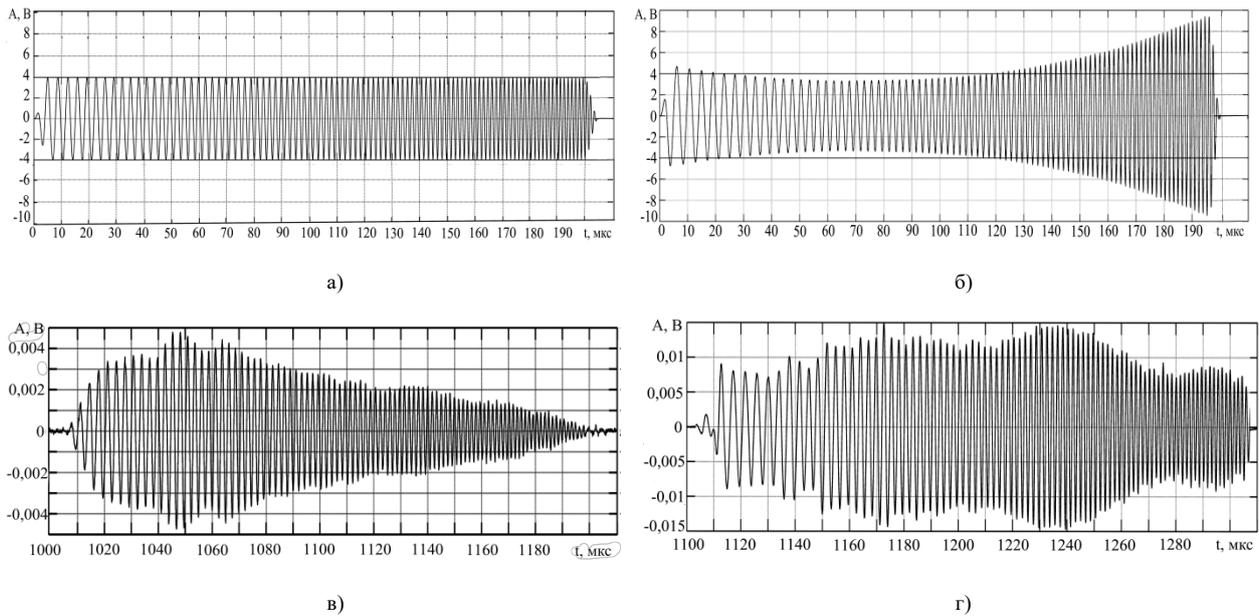


Рис. 3. Излучаемые и принимаемые сигналы:  $S_1$  (а, в),  $S_2$  (б, г).

Для улучшения корреляционных свойств принимаемого сигнала необходимо уменьшить изменения его уровня. Для этого излучаемый сигнал должен иметь изменяющуюся амплитуду. Таким является второй сигнал,  $S_2$  – тоже ЛЧМ-сигнал с изменением частоты от  $f_n=250$  кГц до  $f_e=750$  кГц и длительностью  $T_c=200$  мкс (рис. 3б). Подъем уровня излучаемого сигнала на высоких частотах позволил уменьшить изменения уровня принимаемого сигнала (рис. 3г). Однако такое улучшение достигается (при ограниченности пикового уровня излучения) за счет уменьшения среднего уровня сигнала.

*С. Результаты экспериментов*

Сигнал  $S_2$ , прием в отсутствие шумов. Опорный сигнал (сигнал с выхода диодного коммутатора) и сигналы фазовой и амплитудной автокорреляции приведены на рис. 4а. Принимаемый сигнал (первый отраженный) и сигналы фазовой и амплитудной взаимокорреляции приведены на рис. 4б. Измеренные значения корреляции и времени распространения приведены в табл. 1. Уровень фазовой корреляции принимаемого сигнала,  $R^F/R_0^F=0,95-0,98$ , говорит

о несущественных изменениях его фазовой структуры после прохождения через дно бочки и слой воды. В одиннадцати измерениях время распространения изменялось от 1109,0 до 1109,2 мкс, разброс времени прихода составлял  $\pm 0,1$  мкс.

Сигнал  $S_2$ , прием в присутствии белого шума: ОСШ 1,6, 0,8, 0,64, 0,48 и 0,4. Шум разрушает фазовую структуру сигнала, что приводит к уменьшению коэффициентов фазовой корреляции (от 0,69 до 0,79 при ОСШ=1,6) (рис. 5а, табл. 1). Но форма пиков корреляции остается хорошей и точность измерения времени прихода сигнала не ухудшается, – 0,1 мкс. При уменьшении уровня сигнала, ОСШ=0,8, 0,64 и 0,48, коэффициенты фазовой корреляции уменьшаются (до 0,56-0,69, 0,39-0,54 и 0,25-0,42, табл. 1), но форма пиков корреляции остается хорошей (рис. 5б), и точность измерения времени сохраняется неизменной, 0,1 мкс (табл. 1). Выходные отношения сигнал/шум остаются достаточно высокими ( $\sim 4,0$ ,  $\sim 3,2$  и  $\sim 2,5$ , рис. 5б), что позволяет без труда фиксировать моменты прихода сигналов (превышение пиком корреляции заданного порога).

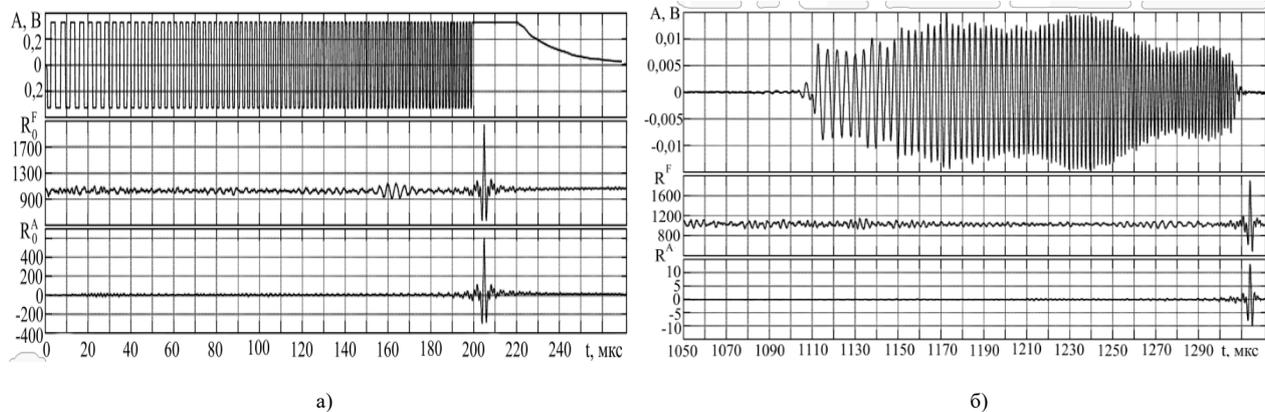


Рис. 4. Прием сигнала  $S_2$  в отсутствие шумов.



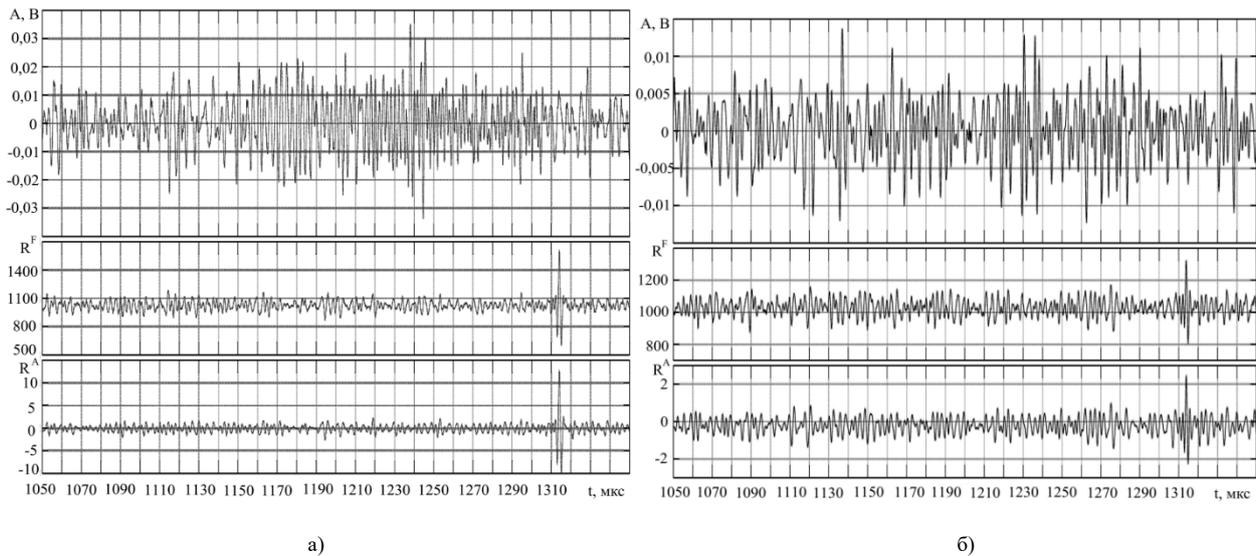
Рис. 5. Прием сигнала  $S_2$  в присутствии белого шума: ОСШ=1,6 (а); ОСШ=0,48 (б).

ТАБЛИЦА 1 ЗНАЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИИ И ВРЕМЕНИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИ РАЗНЫХ ОСШ

$N$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Сигнал <math>S_2</math>, без шума</b>											
$R^F/R_0^F$	0,95	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,97	0,97	0,98	0,95
$t_p$ , мкс	1109,2	1109,0	1109,1	1109,1	1109,0	1109,2	1109,2	1109,1	1109,1	1109,1	1109,2
<b>Сигнал <math>S_2</math>, белый шум: ОСШ=1,6</b>											
$R^F/R_0^F$	0,77	0,69	0,73	0,78	0,71	0,77	0,74	0,77	0,79	0,76	0,76
$t_p$ , мкс	1109,1	1109,2	1109,2	1109,1	1109,1	1109,2	1109,1	1109,1	1109,1	1109,2	1109,1
<b>Сигнал <math>S_2</math>, белый шум: ОСШ=0,8</b>											
$R^F/R_0^F$	0,64	0,67	0,65	0,64	0,68	0,56	0,68	0,67	0,66	0,69	0,63
$t_p$ , мкс	1109,1	1109,1	1109,1	1109,1	1109,0	1109,0	1109,1	1109,0	1109,0	1109,0	1109,1
<b>Сигнал <math>S_2</math>, белый шум: ОСШ=0,64</b>											
$R^F/R_0^F$	0,49	0,54	0,45	0,54	0,52	0,47	0,51	0,46	0,39	0,54	0,47
$t_p$ , мкс	1109,1	1109,1	1109,1	1109,0	1109,0	1109,0	1109,0	1109,1	1109,1	1109,0	1109,1
<b>Сигнал <math>S_2</math>, белый шум: ОСШ=0,48</b>											
$R^F/R_0^F$	0,27	0,32	0,25	0,31	0,42	0,38	0,35	0,40	0,27	0,27	0,28
$t_p$ , мкс	1108,9	1108,9	1109,1	1109,0	1109,0	1109,0	1109,1	1109,0	1109,0	1109,1	1109,0
<b>Сигнал <math>S_2</math>, белый шум: ОСШ=0,4</b>											
$R^F/R_0^F$	0,20	0,21	0,21	0,22	0,21	0,21	0,18	0,27	0,31	0,29	0,18
$t_p$ , мкс	1109,0	1108,9	1109,0	1109,0	1108,9	1109,0	1109,0	1109,0	1108,9	1109,0	1109,0
<b>Сигнал <math>S_1</math>, белый шум: ОСШ=0,4</b>											
$R^F/R_0^F$	0,29	0,29	0,15	0,28	0,20	0,19	0,19	0,30	0,27	0,29	0,25
$t_p$ , мкс	1108,8	1108,9	1108,8	1108,8	1108,8	1108,8	1108,7	1108,8	1108,8	1108,8	1109,0
<b>Сигнал <math>S_2</math>, гармоническая помеха, ОСП=0,5-1,0</b>											
$R^F/R_0^F$	0,24	0,26	0,26	0,29	0,40	0,46	0,18	0,49	0,34	0,45	0,38
$t_p$ , мкс	1108,8	1108,8	1108,7	1108,7	1108,8	1109,0	1108,9	1108,8	1108,9	1109,0	1108,9

При уменьшении входного ОСШ до 0,4 коэффициент фазовой корреляции уменьшается до 0,18-0,31 (табл. 1), выходные отношения сигнал/шум уменьшаются до  $\sim 1,5$ , что делает выделение пиков корреляции проблематичным. Для амплитудной корреляции выходное ОСШ выше, что говорит о худшей эффективности знакового корреляционного приема при малых входных ОСШ. Но и для амплитудного корреляционного приема входное ОСШ=0,4 можно считать предельным. При этом точность измерения времени остается высокой, 0,1 мкс.

#### Сигнал $S_1$ , прием в присутствии белого шума

Использование сигнала  $S_1$ , имеющего в 2,5 раза меньшее, чем сигнал  $S_2$ , пиковое значение уровня, но почти такое же среднее значение (рис. 3) при входном ОСШ=0,4, дало несколько худшие значения

коэффициента фазовой корреляции 0,15-0,30, точности приема  $\pm 0,15$  мкс (табл. 1) и достоверности приема (выходного ОСШ). При высоком уровне шумов определяющей для работы уровнемера является достоверность приема. В этом случае целесообразно использование сигналов с постоянной амплитудой. Но при малом уровне шумов сигналы с изменяющейся амплитудой позволяют увеличить точность приема.

#### Сигнал $S_2$ , прием в присутствии гармонической помехи

При отношении сигнал/помеха (ОСП) от 0,5 до 1,0 (рис. 6, табл. 1) коэффициент фазовой корреляции имел значения от 0,18 до 0,49. Для амплитудной корреляции ОСШ на выходе превышает 2,0, что позволяет без труда регистрировать сигналы. При этом



ОСШ фазовой корреляции меньше, т.е. гармоническая помеха, как и белый шум, в большей степени ухудшает работу фазового канала уровнемера. Во всех этих случаях точность измерения времени ухудшается, но остается достаточно высокой,  $\pm 0,15$  мкс.

#### IV. “ТОНКОСТЕННАЯ ОБОЛОЧКА” – ОБЛАСТЬ ДОПУСТИМЫХ ТОЛЩИН

Определим толщины оболочек, при которых прохождение через них сигнала происходит без существенных искажений фазовой структуры и эффективность корреляционно-фазового приема высока. Рассмотрим случай ЛЧМ-сигнала, частота которого изменяется от  $f_n = 250$  кГц до  $f_s = 750$  кГц.

Прохождение звука через упругую металлическую пластину (плоская падающая волна или преобразователь “значительных” волновых размеров) и формирование акустического поля на расстоянии от нее можно представить в виде двух процессов. Первый связан с механизмом собственно прохождения звука через пластину бесконечных или очень больших размеров и определяется импедансами пластины и жидкости. Второй механизм связан с возбуждением и распространением в пластине ограниченных размеров волн (на собственных частотах) и излучением при этом поверхностью пластины звука.

При изучении прохождения звука через тонкие пластины часто используется приближение, при котором допускают, что передача звука происходит только благодаря колебаниям изгиба (антисимметричные колебания). Для весьма тонких пластин, толщины которых значительно меньше длины продольных волн в материале, эта теория дает достаточно точные результаты [10]. Но для не очень тонких пластин, какие и рассматриваются нами, необходимо

учитывать и поперечные колебания сжатия пластины (симметричные колебания) и связанные с ними продольные колебания пластины [18].

Представление о прохождении звука через пластину неограниченных размеров дают уравнения [19]. Результаты расчетов для угла падения звуковой волны  $\theta = 0^\circ$  и характеристик материала – скорость объемных продольных и поперечных волн  $c_l = 5800$  м/с,  $c_t = 3200$  м/с, плотность  $\rho = 7,9 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, константа Ламэ  $\mu = 80,9 \cdot 10^9$  Па, коэффициент Пуассона  $\sigma = 0,29$ , модуль Юнга  $E = 194,2 \cdot 10^9$  Па, – приведены на рис. 7. Значения импедансов антисимметричных  $Z_a$  и симметричных  $Z_s$  колебаний, коэффициента прохождения  $V$  и фазового сдвига  $\varphi$  приведены в зависимости от произведения частоты на толщину пластины  $fh$  (МГц·мм). Коэффициент прохождения звука через пластину максимален на нулевой частоте и на частотах толщинных резонансов продольных волн ( $fh = 2,9, 5,8, \dots$ ), на которых значения импедансов симметричных или антисимметричных колебаний обращаются в нуль. В области частот толщинных резонансов фаза коэффициента прохождения меняется на  $180^\circ$ , в областях частот между резонансами фаза сигнала изменяется незначительно. При толщине пластины  $h = 3$  мм интервалу частот  $f = 250-750$  кГц соответствуют значения  $fh = 0,75-2,25$ , изменение фазы сигнала в этом интервале составляет  $\pm 3^\circ$ . В случае  $h = 1,0$  мм ( $fh = 0,25-0,75$ ) изменение фазы в этом же интервале составит  $\pm 5^\circ$ , в случае  $h = 0,3$  мм –  $\pm 13^\circ$ . Такие изменения фазы невелики и не ухудшают существенно эффективность корреляционно-фазового приема. При этом можно считать, что такой прием будет эффективным в интервале толщин пластины от 0,3 до 3,6 мм.

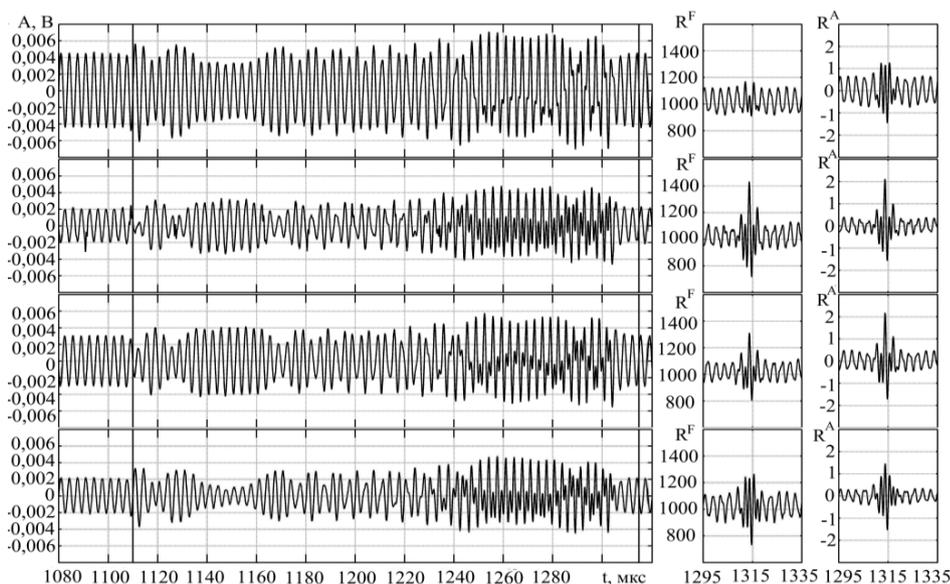


Рис. 6. Прием сигнала  $S_2$  в присутствии гармонической помехи; ОСП от 0,5 до 1,0; сигнал с помехой, пики фазовой и амплитудной корреляции.

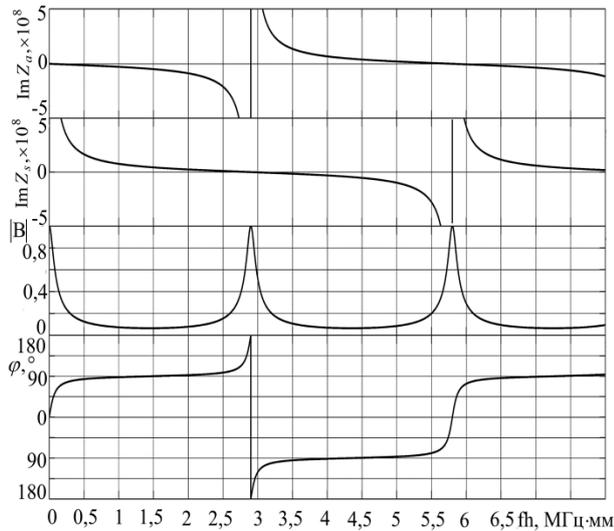


Рис. 7. Прохождение звука через пластину,  $\vartheta=0^\circ$ , сверху вниз: импедансы антисимметричных и симметричных волн; модуль и фаза коэффициента прохождения

При нормальном падении звука на пластину в ней не возбуждаются волны сдвига. Но при не параллельности плоскости преобразователя и поверхности жидкости и отличии угла падения от нормали или при контактном возбуждении пластины и малости размеров площадки нагружения волны сдвига могут возбуждаться. Распространение в пластине волн сдвига приводит к появлению толщинных резонансов этих волн при значениях  $fh$  1,6, 3,2, 4,8, .... Эти резонансы более узкополосные, а уровень принимаемого сигнала на околорезонансных частотах, из-за условий возбуждения, излучения и приема, оказывается значительно более низким, чем в случае частот толщинных резонансов продольных волн. Но этот уровень сигнала может оказаться выше уровня полезного сигнала в межрезонансной области  $fh$  от 0,5 до 2,3, и волны сдвига могут ухудшить условия корреляционно-фазового приема при толщинах пластины более 2,1 мм.

В случае ограниченности размеров пластины появляются собственные (резонансные) частоты, связанные с ее горизонтальными размерами,  $l$  или  $R$ . Образующиеся на поверхности пластины при возбуждении собственных частот стоячие волны приводят к излучению звука. Излучение происходит только благодаря симметричным формам колебаний и обеспечивается за счет центральной зоны поверхности размером в четверть длины волны [20]. Но в рассматриваемом диапазоне частот из-за малости длин волн размер этой зоны крайне мал и уровень излучения будет очень низким. При этом можно считать, что для пластины  $h=0,3-3,6$  мм излучение звука на частотах собственных резонансов, связанных с ее горизонтальными размерами, не будет существенно искажать фазовую структуру сигнала и ухудшать работу уровнемера.

#### ВЫВОДЫ

Рассмотрены акустические методы измерения уровня жидкости через стенку и показано

преимущество времяимпульсных (времяпролетных, TOF) методов перед интерферометрическими и другими. Показаны недостатки методов измерений, используемых в уровнемерах для железнодорожных цистерн.

Показаны преимущества корреляционно-фазового приема сложных сигналов и возможности его использования в случаях измерения уровня через стальную упругую стенку. Рассмотрены вопросы точности измерения времени и уровня и выбора зондирующих сигналов, предложено использование ЛЧМ-сигналов и их корреляционно-фазового приема.

Эксперименты на тонкостенной, 0,8 мм, бочке при использовании ЛЧМ-сигналов частот  $f_c=250-750$  кГц подтвердили малые искажения фазовых структур сигналов при их прохождении через дно и высокую эффективность корреляционно-фазового приема; при отношении сигнал/шум 0,4 получена точность измерения времени  $\sim 0,15$  мкс, соответствующая точности измерения уровня  $\sim 0,1$  мм.

Предложена схема расчетов прохождения широкополосного ЛЧМ-сигнала через упругую стенку (и построения ее амплитудно- и фазочастотных характеристик), учитывающая продольные волны (антисимметричные и симметричные колебания) и сдвиговые волны ее толщинных колебаний, а также стоячие волны резонансных колебаний по длине (диаметру).

Предложен способ выбора в соответствии с характеристиками упругой стенки диапазона частот зондирующего сигнала, обеспечивающего малые искажения его фазовой структуры при прохождении через стенку. Для сигнала с частотами  $f_c=250-750$  кГц определен интервал толщин стенки,  $b=0,3-3,6$  мм, при которых эффективность корреляционно-фазового приема должна быть высокой, а точность измерений уровня – большой.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность своему коллеге Жаворонкову Ю. К. за оказанную помощь в подготовке аппаратурного обеспечения и содействие в проведении экспериментальных работ.

#### ВКЛАД АВТОРОВ

Работы разделов 1 и 4 выполнены совместно Богушевичем В. К., Замареновой Л. Н., Скипой М. И. Работы раздела 2 выполнены Богушевичем В. К. Работы раздела 3 выполнены совместно Богушевичем В. К., Замареновой Л. Н., Котовым Г. М., причем большая их часть выполнена Котовым Г. М.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- [1] *Fiziko-himicheskie svojstva individual'nyh uglevodorodov [Physicochemical properties of individual hydrocarbons]*, V. M. Tatevskij, Ed. Moscow, USSR: Gostoptehizdat, 1960.
- [2] D. N. Sinha, "Noninvasive identification of fluids by swept-frequency acoustic interferometry", *US Patent 5767407 A*, Jun. 16, 1998.



- [3] N. G. Pope, D. K. Veirs, and T. N. Claytor, "Fluid density and concentration measurement using noninvasive in situ ultrasonic resonance interferometry", *US Patent 5359541 A*, Oct. 25, 1994.
- [4] D. N. Sinha, "Noninvasive characterization of a flowing multi-phase fluid using ultrasonic interferometry", *US Patent 6889560 B2*, May 10, 2005.
- [5] D. C. Lizon, G. Kaduchak, and D. N. Sinha, "Ultrasonic liquid level monitor", *US Patent 7114390 B2*, Oct. 3, 2006.
- [6] B. J. Tucker, A. A. Diaz, and B. A. Eckenrode, "Advanced ultrasonic measurement methodology for non-invasive interrogation and identification of fluids in sealed containers", in *Proc. of SPIE*, vol. 6178, pp. 61780K-1–61780K-12, 2006.
- [7] R. DiFoggio "Method and apparatus for an acoustic pulse decay density determination", *US Patent 7024917 B2*, Apr. 11, 2006.
- [8] R. DiFoggio, P. A. Bergren, and J. Han, "Acoustic fluid analysis method", *US Patent 7614302 B2*, Nov. 10, 2009.
- [9] Urovnemer ul'trazvukovoj portativnyj UUP1-P1. Rukovodstvo po ekspluatácii, Kyiv, OOO ND Ltd [Portable ultrasonic level gauge UUP1-P1. Operations manual, Kyiv, ND, Ltd], [Online]. Available: <http://www.eriskip.ru/disc/pdf/UUP1P1.pdf>. Accessed on: April 18, 2017.
- [10] E. L. Shenderov, *Volnovye zadachi gidroakustiki [Wave problems of hydroacoustics]*. Leningrad, USSR: Sudostroenie, 1972.
- [11] Urovnemer ul'trazvukovoj perenosnoj UZUM-2-P. Rukovodstvo po ekspluatácii, S.-Peterburg, ZAO "SPEK" [Portable ultrasonic level gauge UZUM-2-P. Operations manual, S.-Peterburg, "SPEK", JSC], [Online]. Available: [http://spec.ru/files/catalog\\_files/846079.pdf](http://spec.ru/files/catalog_files/846079.pdf). Accessed on: May 30, 2017.
- [12] Texas Instruments. TDC 1000, [Online]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tdc1000.pdf>. Accessed on: July 7, 2017.
- [13] Avtomatizirovannyj ul'trazvukovoj urovnemer AUZUR-02, N. Novgorod [Automated ultrasonic level gauge AUZUR-02, N. Novgorod], [Online]. Available: <http://www.vvgnn.com/data/pages/files/file.1323775818.pdf>. Accessed on: May 30, 2017.
- [14] Urovnemer-analizator Analik-M. Rukovodstvo po ekspluatácii, Kyiv, OOO "NPF "UAT" [Level meter-analyzer Analik-M. Operations manual, Kyiv, "NPF "UAT", Ltd], [Online]. Available: [http://npfuet.com.ua/Analiq\\_manual.pdf](http://npfuet.com.ua/Analiq_manual.pdf). Accessed on: May 17, 2013.
- [15] V. I. Bardyshev, "Akusticheskie i kombinirovannye metody izmerenija urovnej dvuhslajnyh zhidkostey [Acoustical and combined methods for measuring the levels of two-layer liquids]," *Akust. zhurn.*, vol. 48, no. 5, pp. 589-595, 2002.
- [16] W. Munk, and C. Wunsch, "Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring", *Deep-Sea Res.*, vol. 26, pp. 123-161, 1979.
- [17] L. E. Varakin, *Teorija slozhnykh signalov [Theory of compound signals]*. Moscow, USSR: Sov. Radio, 1970.
- [18] L. M. Ljamshev, *Otrazhenie zvuka tonkimi plastinkami i obolochkami v zhidkosti [Sound reflection by thin plates and shells in liquid]*. Moscow, USSR: Izdatel'stvo AN SSSR, 1955.
- [19] S. A. Rybak, B. D. Tartakovskij, "Ob odnom kluchae polnoy zvukoizoljacji pri prohozhenii zvuka cherez sloisto-simmetrichnuju peregorodku [On a case of absolute sound insulation when sound transmitting through the symmetrical layered panel]," *Akust. zhurn.*, vol. 7, no. 4, pp. 497-499, 1961.
- [20] E. Skuchik, *Prostye i slozhnye kolebatel'nye sistemy [Simple and complex vibratory systems]*. Moscow, USSR: Mir, 1971.

Надійшла до редакції 23 січня 2019 р.



# Прецизійні ультразвукові вимірювачі рівня рідини в закритих резервуарах

Богушевич В. К., науковий співробітник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

Замаренова Л. М., науковий співробітник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua) / [zamarenova.l@gmail.com](mailto:zamarenova.l@gmail.com)

Котов Г. М., провідний інженер

e-mail [glebmih@gmail.com](mailto:glebmih@gmail.com)

Скіпа М. І., к.т.н., старший науковий співробітник

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

Державна установа “Відділення гідроакустики Інституту геофізики  
ім. С. І. Субботіна НАН України”

Одеса, Україна

*Анотація*—Розглядаються питання вимірювання рівня рідини в сталевих резервуарах через стінку акустичними методами. При вимірюванні рівня за часом поширення звуку в рідині найкращу точність забезпечує кореляційно-фазовий прийом складних сигналів. Але для вимірювань в сталевих резервуарах такий прийом зазвичай не використовується через спотворення фазової структури сигналу з широкою смугою частот, що проходить через пружну стінку (що має в цій смузі множинні резонанси). Використання в таких випадках кореляційно-фазового прийому можливе при виборі зондувального сигналу, спотворення фазової структури якого при проходженні через стінку будуть малими. Метою роботи є визначення можливостей використання кореляційно-фазового прийому і точності вимірювання рівня, що досягається, за умов різних товщин стінок сталевих резервуарів. Значимість досліджень визначається можливостями багаторазового збільшення точності вимірювань.

Розглянуто акустичні методи та пристрої вимірювання рівня, показано перевагу часово-імпульсних (часово-протічних, TOF) методів перед інтерферометричними та іншими методами при вимірюванні у великих резервуарах. Запропоновано схему розрахунків проходження широкопasmового імпульсного сигналу через пружну стінку (і побудови амплітудно- і фазочастотної характеристик, АЧХ і ФЧХ), що враховує поздовжні і зсувні хвилі товщинних коливань стінки і стоячі хвилі її резонансних коливань по довжині (діаметру), запропоновано спосіб вибору в відповідності до АЧХ і ФЧХ пружної стінки діапазону частот зондувального сигналу, що забезпечує малі спотворення його фазової структури при проходженні через стінку заданої товщини.

Отримано оцінки точностей вимірювання швидкості звуку і рівня рідини, що досягаються, в залізничних цистернах. Експериментальні роботи на тонкостінній, 0,8 мм, бочці з використанням сигналів діапазону частот 250-750 кГц, тобто частот менше частоти першого товщинного резонансу дна бочки, підтвердили мале спотворення фазових структур сигналів при їх проходженні через дно і високу ефективність кореляційно-фазового прийому – при відношенні сигнал/шум 0,4 отримана висока точність вимірювання часу,  $\sim 0,15$  мкс, що відповідає точності вимірювання рівня  $\sim 0,1$  мм. Для сигналу 250-750 кГц визначено інтервал товщин стінки, 0,3-3,6 мм, при яких ефективність кореляційно-фазового прийому має бути високою, а точність вимірювань рівня – великою.

Результати роботи показали, що застосування кореляційно-фазового прийому складних сигналів при вимірюванні рівня рідини через дно тонкостінної сталеві бочки можливо і забезпечує як високу ефективність роботи в умовах шумів, так і високу точність вимірювань. Можна очікувати, що такі ж показники точності і ефективності роботи будуть зберігатися в інтервалі товщин дна, при яких частоти зондувального сигналу будуть менше першої частоти його товщинного резонансу. У випадках великої товщини дна спектр зондувального сигналу може включати області частот між частотами товщинних резонансів. При цьому з'являється можливість використання кореляційно-фазового прийому для вимірювання рівня в резервуарах з широким діапазоном товщин дна.

Бібл. 20, табл. 1, рис. 7.

*Ключові слова* – вимірювання рівня через стінку, поширення звуку, кореляційно-фазовий прийом, спотворення фази сигналу.



UDC 534.2:53.082.4

# Precision Ultrasonic Meters of Fluid Level in Sealed Containers

Bohushevych V. K., researcher

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

Zamarenova L. M., researcher

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua) / [zamarenova.l@gmail.com](mailto:zamarenova.l@gmail.com)

Kotov G. M., leading engineer

e-mail [glebmih@gmail.com](mailto:glebmih@gmail.com)

Skipa M. I., PhD senior researcher

e-mail [info@vgaigph.org.ua](mailto:info@vgaigph.org.ua)

State Institution "Hydroacoustic Branch of Institute of Geophysics by S. I. Subbotin name of NAS of Ukraine"  
Odesa, Ukraine

**Abstract**—The problems of measuring the fluid level in steel containers through a wall by acoustic methods are considered. When measuring the level by sound propagation time in a fluid in case of an inelastic wall the best accuracy is provided by the correlation-phase reception of compound signals. But for measurements in steel containers, such a technique is usually not used due to phase structure distortions of a signal with a broad frequency bandwidth when transmitting through an elastic wall (having multiple resonances in this band). The use of correlation-phase reception in such cases may be possible by choice a probing signal, a phase structure distortion of which will be small when transmitting through a wall. The aim of the work is to determine the possibilities of using the correlation-phase reception and the achievable accuracy of level measuring in the conditions of different wall thickness of steel containers. The significance of research is determined by the possibilities of a multiple increase in the measuring accuracy.

Acoustic methods and level measuring devices are considered; the advantage of time-pulse (time-of-flight, TOF) methods over interferometric (including swept-frequency acoustic interferometry, SFAI) and other measuring methods in large containers is shown. A method of level measuring using the correlation-phase reception of compound signals and a scheme for calculating the broadband impulse signal transmission through an elastic wall (and building the amplitude-frequency and phase-frequency characteristics) taking into account the longitudinal and shear waves of thickness wall vibrations and standing waves of its resonant vibrations along the length (diameter) are proposed. A method for selecting the probing signal frequency range according to an amplitude-frequency characteristic of elastic wall which provide the low phase structure distortions when transmitting through a wall is suggested.

The achievable accuracy estimates of measuring the sound velocity and the fluid level in rail tank wagons are obtained. Experimental works carried out on a thin-walled (0.8 mm) barrel with signals of the frequency range of 250-750 kHz (i.e. frequencies below the first thickness resonance frequency of barrel bottom) are confirmed the small phase structure distortion of signals when transmitting through the bottom and the high efficiency of the correlation-phase reception. With a signal-to-noise ratio of 0.4, a high time measuring accuracy of  $\sim 0.15 \mu\text{s}$  corresponding to a level measuring accuracy of  $\sim 0.1 \text{ mm}$  is obtained. For signals of frequency range 250-750 kHz the interval of wall thickness is defined as 0.3-3.6 mm at which the efficiency of the correlation-phase reception and the level measuring accuracy should be high.

The results showed that the use of correlation-phase reception of compound signals when measuring a fluid level through the bottom of a thin-walled steel barrel is possible and provides both high operating efficiency in the noise conditions and high measuring accuracy. It can be expected that the same accuracy factors and operating efficiency will be kept in a bottom thicknesses range at which the probing signal frequencies will be less than the first bottom thickness resonance frequency. In cases of large bottom thicknesses, if the first bottom thickness resonance frequency is low, the probing signal spectrum may include frequency regions between the thickness resonance frequencies. In this case, it becomes possible to use the correlation-phase reception for the level measuring in containers with a wide range of bottom thicknesses.

Ref. 20, tab. 1, fig. 7.

*Keywords* – level measurement through the wall, sound transmission, correlation-phase reception, signal phase distortion

