

УДК 620.179.162

Метод комплексного контроля уровня, плотности и вязкости многослойных жидкостей в резервуарах на основе ультразвукового зондирования

Борминский С.А.

Самарский национальный исследовательский университет

имени академика С.П. Королева, Московское шоссе 34, Самара, 443086, Россия

e-mail: b80@mail.ru

Статья поступила 03.09.2019

Аннотация

В статье предлагается акустический метод комплексного контроля параметров многослойных жидкостей, в частности авиационных топлив с возможностью контроля подтоварной воды. Метод основан на распространении ультразвукового сигнала вверх резервуара от излучателя через многослойную среду, при этом над излучателем на известном расстоянии располагается линейка акустических приёмников. Известное расстояние между приёмниками позволяет определить скорость звука в данном слое, далее с учётом скорости звука по времени распространения определяется высота границы сред в резервуаре, вязкость среды определяется по затуханию амплитуды. Данный метод повышает точность и достоверность измерения параметров, а также позволяет отказаться от дополнительного собирающего звук волновода и реперных отражателей, которые обычно используются для высокоточных измерений. Для реализации измерений рассматриваются различные варианты расположения сред относительно акустических приёмников, на основе чего разработан алгоритм обработки сигналов.

Комбинация рассмотренных вариантов расположения позволяет получить все необходимые случаи при эксплуатации. Создан макетный образец устройства, который при использовании недорогих компонентов показал погрешности совместного измерения уровня 0,1%, плотности – 5% и вязкости –12%.

Ключевые слова: контроль, уровень, плотность, вязкость, ультразвук, повышение точности.

Введение

Оперативный контроль параметров жидких сред, находящихся в резервуарах предприятий, занимающихся производством, транспортировкой и хранением жидкой продукции является важнейшей задачей в области измерительной техники. Задача организации мониторинга резервуаров с топливом, керосинами, бензинами, технической водой и другими жидкостями актуальна для авиационной промышленности, поскольку непосредственно связана с обеспечением безопасности и эффективным использованием энергоресурсов в аэропортах. Знание точной массы жидкости позволяет избегать дополнительных расходов, связанных с избыточностью хранения, а также несанкционированного доступа к продукту. Масса продукта определяется как произведение плотности на объём, который, в свою очередь, определяется из градуировочных таблиц резервуара по известному измеренному уровню. Более сложной задачей является контроль параметров многослойных жидкостей, данная задача стоит в многих отраслях промышленности,

где возможно расслоение продукта, например, при хранении нефти внизу резервуара оседает подтоварная вода. Несмотря на современное развитие методов измерений, в настоящее время недостаточно места уделено комплексным методам контроля сразу нескольких параметров многослойных жидкостей, которые позволяют уменьшить количество применяемых датчиков, что позволит упростить монтаж и обслуживание устройств, а также повысить надёжность, и сделать эксплуатацию более выгодной.

В настоящее время известны ультразвуковые методы контроля уровня, плотности и вязкости жидких сред [1-18], существуют также методы совместного измерения уровня, плотности и вязкости [4,6,7,13,14,15]. Основной целью проведённых исследований является повышение точности и достоверности измерений, для реализации чего в данной статье предлагается вместо волновода использовать линейку акустических приёмников, расположенных по высоте резервуара.

Теоретическая часть

Точность ультразвукового контроля напрямую связана с точностью определения скорости звука в среде распространения волн. Одним из распространённых методов для определения скорости звука является установка расположенных на известном расстоянии реперных отражателей [2-4,6,10,15,16], которые отражают часть акустического сигнала обратно к акустическому преобразователю. Таким образом, зная расположение и геометрические размеры отражателя, можно определить скорость звука и затухание в среде, из которых затем определяются параметры жидкости. В связи с развитием микропроцессорной

техники, снижением размеров и стоимости пьезоакустических преобразователей вместо применения реперных отражателей предлагается использовать отдельные акустические приёмники, при этом нет необходимости устанавливать волновод (рисунок 1).

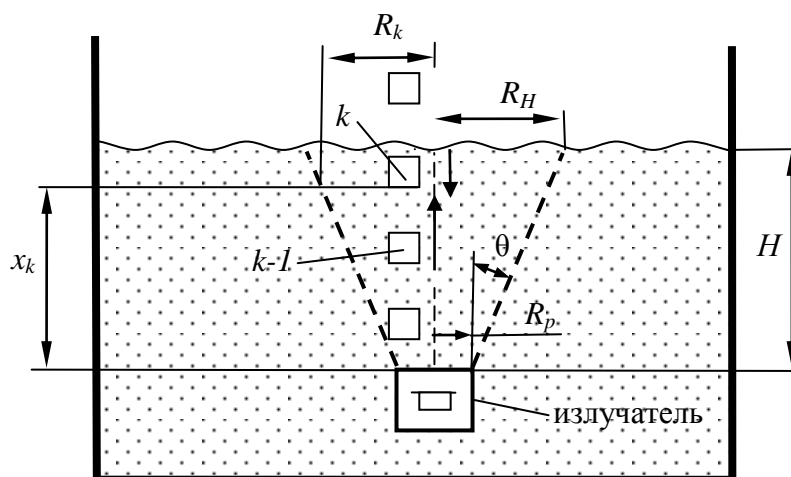


Рисунок 1 – Иллюстрация к математической модели устройства с распространением волн в свободном пространстве

$k-1, k$ – акустические приёмники с соответствующими порядковыми номерами;
 x_k – высота k -го приёмника над излучателем; R_p – радиус излучателя; R_H – радиус расхождения волны на высоте H ; R_k – радиус расхождения волны на высоте x_k

Применение акустических приёмников вместо реперных отражателей даёт ряд преимуществ. Во-первых, каждый приёмник фиксирует прямой сигнал большой амплитуды от излучателя, что повышает помехоустойчивость и как следствие – происходит повышение точности определения скорости звука на отрезках между приёмниками, что приводит к увеличению точности в целом. В системах с реперными отражателями амплитуда отражённого от репера сигнала слабее в десятки раз, поскольку отражающая способность реперов, как и их количество

вынужденно ограничиваются, чтобы не вызвать сильное затухание распространяющемуся сигналу. Таким образом, применение отдельных акустических приёмников также практически снимает ограничения на их количество и шаг между ними. Собственно, увеличение амплитуды и позволяет отказаться от волновода, который не даёт рассеиваться слабым отражённым сигналам, при этом приём отраженного от границ сред сигнала осуществляется ближайшим приёмником к границе сред. Диаграмма направленности излучателя позволяет сформировать луч, который без дополнительных волноводов может быть принят акустическими приёмниками на расстояния в десятки метров, что достаточно для любого резервуара. Отказ от волновода упрощает обслуживание системы – достаточно следить за чистотой рабочих поверхностей электроакустических устройств и отражателя.

Второе преимущество использования акустических приёмников – простота определения границ расслоившейся жидкости в резервуаре. Коэффициент отражения от границы сред определяется выражением [25]:

$$K = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1}, \quad (1)$$

где ρ_1, ρ_2 – плотность первой и второй среды соответственно; c_1, c_2 – скорость звука в первой и второй среде соответственно.

При небольшом различии произведений $\rho_1 \cdot c_1$ и $\rho_2 \cdot c_2$ коэффициент отражения может быть незначительным. В устройстве с реперными отражателями возникает проблема отличить сигналы от реперных отражателей с сигналами отражения от

границы сред расслоённой жидкости, поскольку амплитуды их могут иметь одинаковые значения.

Третье преимущество связано с тем, что акустические приёмники расположены почти в неограниченной контролируемой среде – расслоение в области приёмников соответствует расслоению в резервуаре. При применении волноводов внутри него не обеспечивается такое же расслоение и уровень жидкости, как снаружи, поскольку соединение объёма волновода с баком происходит внизу резервуара и заполняться волновод будет более плотной средой снизу резервуара. Частично проблему решают отверстия в волноводе, которые к тому же могут выполнять функцию реперных отражателей, однако, обмен жидкостью из внутренней полости трубы с резервуаром всё равно оказывается затруднённым. Отсутствие волновода в предлагаемом устройстве гарантирует точный результат измерений слоистых сред.

Отсутствие волновода также позволяет работать устройству почти на любых частотах, при этом зондирующий импульс не меняет свою форму вплоть до самых высоких частот, где возникает дисперсия скорости звука из-за процессов релаксации объемной вязкости.

Для разработки математической модели примем некоторые допущения.

Пусть акустический излучатель расположен внизу резервуара, зондирующий импульс распространяется вверх по жидкой многослойной среде. Излучатель формирует волну мощностью P в пределах угла рассеивания θ (рисунок 1). Угол расхождения волны будет учитываться для вычисления влияния рассеивания

мощности в пространстве. Будем считать, что размеры акустических приёмников малы и не оказывают значительного влияния на распространение дальнейшего сигнала. Малые размеры приёмников также позволяют считать фронт волны в их окрестностях плоским. Также расположение приёмников с незначительным смещением относительно друг друга позволяет считать, что предыдущие приёмники не вносят влияние на распространяющийся сигнал к следующим приёмникам. Далее необходимо рассмотреть несколько вариантов возможных состояний резервуара.

Первый рассматриваемый вариант – границы сред внутри контролируемого продукта отсутствуют, то есть резервуар заполняется однородной средой, при этом уровень жидкости выше второго приёмника. Пусть k -й приёмник – верхний, погружённый в жидкость (рисунок 1). Данный приёмник зафиксировывает два сигнала – прямой от излучателя и отражённый от границы сред. Скорость звука в среде рассчитывается на интервале между $k-1$ и k приёмниками с учётом времени распространения $t_{k-1,k}$ по формуле:

$$c_{k-1,k} = \frac{(x_k - x_{k-1})}{t_{k-1,k}}. \quad (2)$$

Плотность среды может быть рассчитана двумя способами. Если в резервуаре жидкость с заранее неизвестными свойствами, то плотность среды определяется с помощью второго канала (канала измерения плотности) акустического приёмника. Фактически, в таком случае каждый акустический приёмник состоит из двух пьезодатчиков, первый канал принимает звуковое давление в открытой среде,

второй канал принимает звуковое давление через буферный стержень. Из (1) плотность среды вычисляется выражением:

$$\rho_i = \frac{\rho_b c_b}{c_i} \left(\frac{2}{W} - 1 \right), \quad (3)$$

где ρ_b, c_b – плотность и скорость звука буферного стержня;

W – отношение акустического давления в буферном стержне к акустическому давлению в открытой среде, по факту это будет являться отношением напряжений двух каналов одного приёмника.

В случае, когда применяются заранее известные жидкости, в частности, нефтепродукты, акустический приёмник может быть одноканальным, а определение плотности осуществляется по заранее известным зависимостям скорости звука от плотности $c(\rho)$. Например, для товарных нефтепродуктов в диапазоне плотностей $0.7 - 0.95$ кг/м³ может быть использована аппроксимация с погрешностью 2%: [10]:

$$c(\rho) = 6.237 \cdot 10^3 - 2.22 \cdot 10^4 \cdot \rho + 3.003 \cdot 10^4 \cdot \rho^2 - 1.249 \cdot 10^4 \cdot \rho^3 \quad (4)$$

Для определения уровня заполнения резервуара H используется формула:

$$H = x_k + c \frac{\Delta t}{2}, \quad (5)$$

где Δt – время распространения от k -го приёмника и обратно.

Для определения вязкости необходимо вычислить поглощение жидкостью звуковой волны. Затухание звуковой волны в свободной среде состоит из основных двух составляющих: поглощения и рассеивания. Поглощение, возникающее за счёт внутренней диссипации энергии, уменьшает звуковое давление в среде по экспоненциальному закону от расстояния [25]:

$$p = p_0 e^{-ax}, \quad (6)$$

где a – коэффициент затухания, который определяется по формуле:

$$a = \frac{b\omega^2}{2\rho c^3}, \quad (7)$$

где b – диссипативный коэффициент.

Диссипативный коэффициент в классическом виде состоит из трёх составляющих, но для жидкостей может быть упрощён до вида:

$$b = \frac{4}{3}\eta + \zeta, \quad (8)$$

где η – сдвиговая вязкость; ζ – вторая или объёмная вязкость.

Сдвиговая вязкость (чаще используется просто термин «вязкость») является основным параметром в механике, определяющим трение между слоями жидкости или газа в уравнении Навье-Стокса. Именно этот параметр влияет на текучесть и энергетические затраты при перекачивании вещества, поэтому является искомым параметром, требующим контроля. Вторая вязкость в жидкостях обычно имеет тот же порядок, что и сдвиговая вязкость, однако, существуют жидкости, в которых вторая вязкость больше в десятки и сотни раз. При известном соотношении между ними ν сдвиговая вязкость равна:

$$\eta = \frac{b}{\left(\frac{4}{3} + \nu\right)} \quad (9)$$

Коэффициент ν берется из таблиц в зависимости от контролируемой жидкости, выбор значения ν также может быть автоматизирован с учётом имеющихся измерений скорости звука и плотности среды.

Рассеивание волны является второй причиной уменьшения сигнала в приёмниках, влияние рассеивания необходимо учитывать несмотря на существующие излучатели с узкой диаграммой направленности. Интенсивность звука I определяется по формуле [25]:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}, \quad (10)$$

где p – амплитудное значение давления.

С другой стороны, интенсивность – это отношение мощности излучения \dot{P} к площади сечения S . Тогда амплитуда давления в удалённой на расстояние x точке с учётом диссипативных сил в среде определится:

$$p = \sqrt{\frac{2\rho c \dot{P}}{S}} e^{-\alpha x}. \quad (11)$$

В данной задаче предлагается использовать отношение между давлениями акустических приёмников, поскольку при этом необходимо знать только угол расхождения волны θ , а от мощности излучения результат затухания не зависит. Затухание сигнала Q между соседними приёмниками с порядковыми номерами $k-1$ и k составит:

$$Q_{k-1,k} = \frac{p_k}{p_{k-1}} = \sqrt{\frac{S_{k-1}}{S_k}} \frac{e^{-\alpha_1 x_k}}{e^{-\alpha_1 x_{k-1}}} = \frac{R_{k-1}}{R_k} e^{-\alpha(x_k - x_{k-1})}. \quad (12)$$

или для конкретного случая с учётом тригонометрических преобразований:

$$Q_{k-1,k} = \frac{R_p + x_{k-1} \operatorname{tg} \theta}{R_p + x_k \operatorname{tg} \theta} e^{-\alpha(x_k - x_{k-1})}$$

(13)

Диссипативный коэффициент на участке между приёмниками $k-1$ и k для дальнейшего вычисления вязкости с учётом (7) составит:

$$b_{k-1,k} = \frac{2\rho c^3 \ln\left(\frac{1}{Q_{k-1,k}} \sqrt{\frac{S_{k-1}}{S_k}}\right)}{\omega^2(x_k - x_{k-1})} \quad (14)$$

Или с учётом (13):

$$b_{k-1,k} = \frac{2\rho c^3 \ln\left(\frac{R_p + x_{k-1} \operatorname{tg} \theta}{Q_{k-1,k} (R_p + x_k \operatorname{tg} \theta)}\right)}{\omega^2(x_k - x_{k-1})} \quad (15)$$

Далее по формуле (9) вычисляется вязкость. Следует отметить, что при близком расположении приёмника к границе сред может наблюдаться сложение прямой и отражённой волны, что может сделать невозможным точное определение границы. Для такого случая уровень жидкости лучше определять предыдущим приёмником.

Второй вариант расположения сред в резервуаре – имеется две фракции: среда 1 и среда 2, а каждую из сред приходится по высоте минимум два акустических приёмника (рисунок 2, граница сред между приёмниками k и $k+1$).

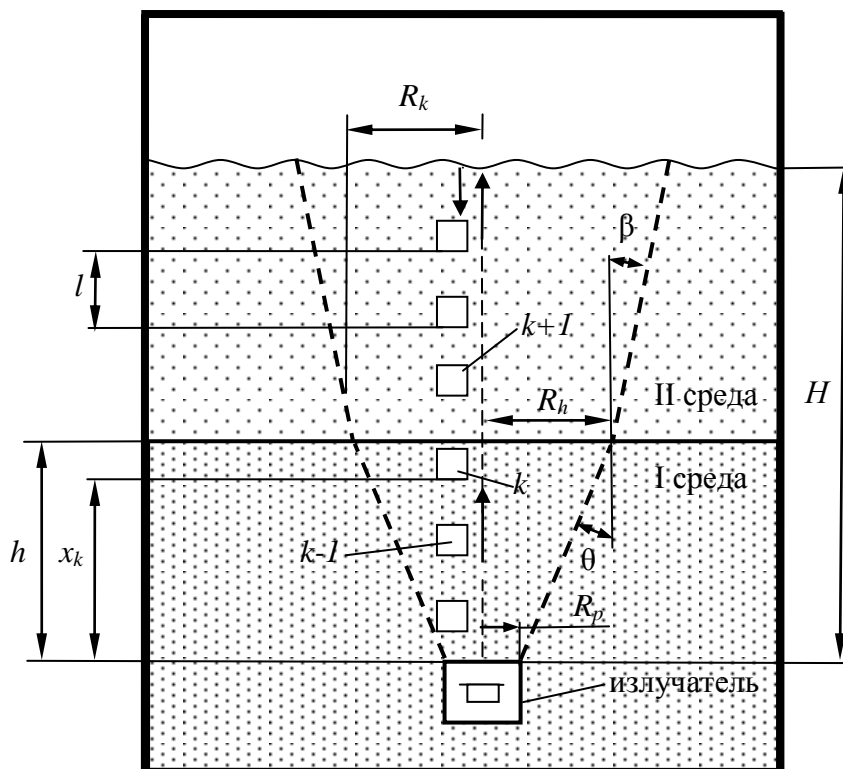


Рисунок 2 – Случай с расслоением жидкости в резервуаре на две фракции $k-1, k, k+1$ – акустические приёмники с соответствующими порядковыми номерами; l – шаг между акустическими приёмниками; h – высота над излучателем границы между первой и второй средой; x_k – высота k -го приёмника над излучателем; R_p – радиус излучателя; R_h – радиус расхождения волны на высоте h ; R_k – радиус расхождения волны на высоте x_k

Углы θ и β связаны между собой по закону Снеллиуса:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} \quad (16)$$

Для определения уровня первой среды h можно использовать формулу (5), для плотности – (3) или (4), для вязкости – (15) с применением (9). Скорость звука, плотность второй среды определяются аналогично на интервале между

приёмниками $k+1$ и $k+2$, диссипативный коэффициент по аналогии с выражением (15) будет равен

$$b_{k+1,k+2} = \frac{2\rho c^3 \ln\left(\frac{R_h + (x_{k+1} - h)tg\beta}{Q_{k+1,k+2}(R_h + (x_{k+2} - h)tg\beta)}\right)}{\omega^2 l} \quad (17)$$

или с учётом тригонометрических и алгебраических преобразований

$$b_{k+1,k+2} = \frac{2\rho c^3 \ln\left(\frac{(R_p + h \cdot tg\theta) \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin\theta}\right)^2 - 1} + x_{k+1} - h}{Q_{k+1,k+2} \left((R_p + h \cdot tg\theta) \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin\theta}\right)^2 - 1} + x_{k+2} - h \right)}\right)}{\omega^2 l} \quad (18)$$

Рассмотрим более общий случай по отношению ко второму варианту, когда имеется несколько слоёв жидкости, причём на каждый слой по высоте приходится минимум два акустических приёмника. Скорость звука, плотность и высота границ сред вычисляются по формулам (2), (3), (5). Далее рассчитывается затухание в каждом слое. Для общего случая, когда имеется несколько слоёв радиус R_x на высоте x от излучателя может быть вычислен по формулам:

$$R_x = R_p + x \cdot tg\theta \quad \text{– ниже границ сред;}$$

$$R_x = R_{h1} + (x - h_1) \cdot tg\beta = R_p + h_1 \cdot tg\theta + \frac{x - h_1}{\sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin\theta}\right)^2 - 1}} \quad \text{– выше 1 границы;}$$

$$R_x = R_{h2} + (x - h_2) \cdot tg\zeta =$$

$$= R_p + h_1 \cdot tg\theta + \frac{h_2 - h_1}{\sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin\theta}\right)^2 - 1}} + \frac{x - h_2}{\sqrt{\left(\frac{c_1}{c_3 \sin\theta}\right)^2 - 1}} \quad \text{– выше 2 границы,} \quad (19)$$

где h_1, h_2 – границы сред внутри жидкости.

Аналогичным образом можно получить выражения для любого количества границ. Диссипативный коэффициент рассчитывается по формуле (14) с учётом рассчитанных по формулам (19) радиусов.

Рассмотренный случай, когда на каждую среду приходится по высоте минимум два приёмника, позволяет точнее всего определять параметры каждой среды, однако, на практике могут возникать дальнейшие ситуации с расслоёнными жидкостями. Для определения параметров в некоторых случаях приходится определять коэффициент отражения и прохождения сигнала через границы сред, ввиду ограниченных размеров приведём конечные формулы для получения искомых параметров.

Случай, когда среда в резервуаре однородна, уровень заполнения резервуара находится между первым и вторым приёмником. Конструктивно первый приёмник устанавливается в резервуаре максимально низко, варианты границ ниже первого приёмника не рассматриваются. Скорость звука в среде рассчитывается по формуле (2) на интервале между излучателем первым приёмником. Плотность среды и уровень заполнения резервуара рассчитываются по формулам (3) и (5), диссипативный коэффициент определится формулой:

$$b = \frac{\rho c^3 \ln\left(\frac{R_p + x_1 \operatorname{tg} \theta}{Q_{1,1+}(R_p + (x_1 + c\Delta t)\operatorname{tg} \theta)}\right)}{\omega^2(x_H - x_1)}, \quad (20)$$

где $Q_{1,1+}$ – затухание обратного импульса по сравнению с прямым;

Δt – время распространения импульса от первого датчика до границы сред и обратно.

Случай, когда в резервуаре имеется две фракции: среда 1 и среда 2, на вторую среду приходится по высоте минимум два акустических приёмника, граница сред расположена между первым и вторым акустическим приёмником. Данная ситуация достаточно распространена, поскольку уровень нижней тяжёлой фракции в рассеявшейся жидкости, в частности в нефтепродуктах, обычно невелик. В данном случае скорость звука в первой среде находится на отрезке между излучателем и первым приёмником, плотность первой среды определяется также первым приёмником. Найти скорость звука, плотность, диссипативный коэффициент второй среды и уровень заполнения резервуара H можно по ранее описанным формулам, диссипативный коэффициент первой среды определяется на участке между излучателем и первым приёмником по формуле:

$$b_{0,1} = \frac{2\rho c^3 \ln\left(\frac{R_p}{Q_{0,1}(R_p + x_1 \operatorname{tg} \theta)}\right)}{\omega^2 x_1}, \quad (21)$$

где $Q_{0,1}$ – отношение акустических давлений около первого приёмника и излучателя (последнее значение определяется калибровкой).

Ещё одна распространённая ситуация, когда в резервуаре имеется две фракции: среда 1 и среда 2, граница сред расположена между первым и вторым приёмником, граница жидкость/воздух расположена между вторым и третьим приёмником. В данной ситуации скорость звука в первой среде находится также на отрезке между излучателем и первым приёмником, плотность первой среды

определяется первым приёмником, диссипативный коэффициент определится по формуле (20). Плотность во второй среде измеряется акустическим приёмником 2, скорость звука во второй среде можно определить по формуле:

$$c_2 = \frac{\rho_1 c_1}{\rho_2} \frac{1-U}{U+1}, \quad U = Q_{1,1+} \frac{R_p + (x_1 + c_1 \Delta t_1) \operatorname{tg} \theta}{R_p + x_1 \operatorname{tg} \theta} e^{\alpha c_1 \Delta t_1}, \quad (22)$$

где $Q_{1,1+}$ – затухание отражённого от границы I/II сред импульса по сравнению с прямым;

Δt_1 – время распространения импульса от первого датчика до границы сред и обратно;

α – коэффициент затухания первой среды.

Уровень жидкости H определится по формуле (2) для второй среды.

Диссипативный коэффициент во второй среде определится выражением:

$$b_2 = \frac{\rho_2 c_2^3}{\omega^2 (x_H - x_2)} \ln \left(\frac{(R_p + h \cdot \operatorname{tg} \theta) \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin \theta}\right)^2 - 1 + x_2 - h}}{Q_{2,2+} ((R_p + h \cdot \operatorname{tg} \theta) \sqrt{\left(\frac{c_1}{c_2 \sin \theta}\right)^2 - 1 + x_2 - h + c_2 \Delta t_2})} \right) \quad (23)$$

где $Q_{2,2+}$ – затухание отражённого от границы жидкость/воздух импульса по сравнению с прямым;

Δt_2 – время распространения импульса от второго датчика до рассматриваемой границы сред и обратно.

Выше были рассмотрены основные ситуации, которые могут возникнуть при измерении параметров жидкости, другие случаи могут быть получены комбинацией ранее описанных ситуаций.

Алгоритм работы устройства

Для получения измерительной информации предлагается следующий алгоритм работы устройства.

1. Формируется зондирующий импульс. Поскольку при наличии линейки приёмников слабым отражённым сигналам нет необходимости проходить большие расстояния, высокое отношение сигнал/шум позволяет отказаться от длительных посылок, вполне достаточным является один период синусоиды или меандра.

2. Принимаются сигналы с акустических приёмников, оцифровываются и записываются в память устройства. Следует отметить, что устройству нет необходимости непрерывно записывать сигналы со всех приёмников, достаточно одновременно слушать сигналы с трёх приёмников, переключая их по очереди по ходу распространения сигналов. Сначала прослушиваются 1й, 2й и 3й акустические приёмники. Когда прямая волна проходит третий приёмник, активный канал АЦП переключается с первого на четвёртый, когда волна проходит четвёртый - активный канал АЦП переключается со второго на пятый приёмники и так процесс продолжается до самого верха резервуара, при этом фиксируется время переключения.

3. Определение времени распространения импульсов и определение затухания сигналов. Грубо время распространения методом компаратора определяется ещё в предыдущем пункте для переключения каналов. Для получения точного времени распространения акустических сигналов используются цифровые полосовые фильтры, что фактически представляет собой преобразование Фурье. Применение

спектрального анализа позволяет отфильтровать ненужные частотные диапазоны вместе с помехами, затем точнее найти время распространения импульса, а также затухание сигнала.

4. По времени отражения определяется расположение границ сред между приёмниками, затем с учётом положения сред по вышеприведённым формулам происходит вычисление скорости звука, уровня, плотности и диссипативного коэффициента для каждого слоя. По значениям скорости звука и плотности из таблиц выбирается значение v и по формуле (9) определяется вязкость.

Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований был создан макетный образец устройства на недорогом 32 разрядном микроконтроллере STM32F303VCT6, который имеет 4 встроенных АЦП со времени выборки 0.2мкс, общее количество аналоговых входов свыше 30, что подходит для работы с многоканальными датчиками. В качестве акустического излучателя использовался переделанный трансдюсер от эхолота. Переделка заключалась в создании с узкой диаграммы направленности помощью механических доработок. В качестве акустических приёмников использовались датчики из материала ЦТС-19, диаметр датчика 5мм, формирователь зондирующего сигнала и многоканальный приёмный усилитель выполнены на операционных усилителях по классическим схемам, период зондирующего импульса составлял 5мкс, что соответствует максимуму при спектральном разложении на частоте 200кГц. Эксперимент проводился в резервуаре высотой 1.5м и диаметром 400мм, всего применено 10 акустических приёмников с

шагом 100мм. В качестве жидкости использовались вода, дизельное топливо, керосин, моторное масло, причём в ходе эксперимента в резервуаре имелось до трёх слоёв одновременно. Измерения уровня контролировались рулеткой, а также добавлением известного объема с пересчётом в уровень. Измерения плотности проводились ареометром АНТ-1, определение вязкости – вискозиметром ВПЖ-1. Разработанное устройство показало точность измерения уровня сред с относительной погрешностью 0,1%, относительная погрешность измерения плотности составила 5%, вязкости – 12%, что является хорошим результатом для макетного образца.

Заключение

Основной полученный результат – создание метода комплексного контроля уровня, плотности и вязкости, позволяющего контролировать многослойные среды, в частности – авиационные жидкости с возможностью контроля подтоварной воды, при этом рассмотрены различные варианты расположения сред по отношению к акустическим приёмникам. Разработан алгоритм обработки сигналов, который благодаря прослушиванию нужных в данный момент приёмников позволяет экономить ресурсы микроконтроллера: в частности, оперативную память и АЦП. Создан макетный образец устройства, эксперименты с которым показали возможность реального применения разработанного метода и неплохие метрологические характеристики с учётом недорогих применяемых компонентов.

Библиографический список

1. Lucklum F., Jakoby B. Non-contact liquid level measurement with electromagnetic–acoustic resonator sensors // Measurement Science and Technology, 2009, vol. 20, no. 12, pp. 1 - 5.
2. Borminskii S.A., Skvortsov B.V. A method of increasing the accuracy of electronic–acoustic instruments for measuring liquid level // Measurement Techniques, 2006, vol. 49, issue 8, pp. 820 - 824.
3. Tod A. Oblak, Daniel F. Dudek, John R. Smith. Patent 5319972 US, G21C17/035 Ultrasonic liquid level measurement system. Current Assignee Westinghouse Electric Co LLC. - priority applications 19.10.1992.
4. Borminskii S.A., Solntseva A.V., Skvortsov B.V. Integrated acoustic monitoring system for jet fuel tanks // Russian Aeronautics, 2017, vol. 60, issue 1, pp. 110 - 115.
5. Разносчиков В.В., Демская И.А. Математическая модель расчета теплофизических свойств синтетического жидкого топлива // Труды МАИ. 2012. № 50. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=28611>
6. Terzic J., Nagarajah C.R., Alamgir M. Fluid level measurement in dynamic environments using a single ultrasonic sensor and Support Vector Machine (SVM) // Sensors and Actuators A: Physical, 2010, vol. 161, no. 1 – 2, pp. 278 - 287.

7. Lawrence C. Lynnworth Ultrasonic measurements for process control, London, Academic Press, 1989, 683 p.
8. Степанов Р.Н., Кожевников И.А. Совершенствование средств мониторинга состояния жидкостных систем воздушных судов по параметрам промышленной чистоты // Труды МАИ. 2018. № 98. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90234>
9. Ballantine D.S., Robert Jr., White S.J., Antonio M., Ricco J., Zellers E.T., Frye G.C., Wohltjen H. Acoustic Wave Sensors – Theory, Design, & Physico-Chemical Applications, London, Academic Press, 1996, 451 p.
10. Skvortsov B.V., Solntseva A.V., Borminskii S.A. Rodionov L.V. Theoretics of Remote Acoustic Monitoring of the Level and Density of Fluid Contacting Media at the Interface // Acoustical Physics, 2016, vol. 62, no. 6, pp. 747 - 753.
11. Бусурин В.И., Медведев В.М., Карабицкий А.С., Гроппа Д.В. Алгоритмы анализа цифровой информации для оптимизации контроля систем управления // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87277>
12. Borminskii S.A., Parshina A.V., Skvortsov B.V. A method for acoustic measurement of length, diameter and internal condition of transportation pipelines // Journal of Physics Conference Series 1111:012079, December 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1111/1/012079
13. Nakagawa T., Hyodo A., Osada K., Kurata H., Oho S. Contactless Liquid-Level Measurement With Frequency-Modulated Millimeter Wave Through Opaque Container // Sensors Journal, IEEE, 2012, vol. 13, no. 3, pp. 928 - 933.

14. Солнцева А.В., Борминский С.А., Скворцов Б.В. Способ дистанционного контроля уровня и плотности жидкости в резервуаре. Патент 2614343, G01F 23/296, 05.11.2015.
15. Борминский С.А., Солнцева А.В., Скворцов Б.В. Устройство измерения уровня и плотности нефтепродуктов. Патент 178615, G01F 23/296, 04.04.2017.
16. R. Schaefer, S. von Dosky, W. Ens. Patent US 2016/0320226A1. Determining height of a liquid level interface in a container from acoustic signal or echo time measurement, Assignee: Siemens Industry, INC. - № 14/860,889, publ. 03.11.2016.
17. Webster J., Eren H. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook (Electrical Engineering Handbook), Florida, CRC Press, 2014, 3559 p.
18. Jyh-Hong Wu, Fang-Pang Lin, Yi-Hao Hsiao, Te-Lin Chung. Patent 8184848B2 US, G06K 9/00, Liquid Level Detection Method, Assignee: National Applied Research Laboratories (TW), № 2010/0322462 A1, 22.05.2012.
19. Duan W, Kirby R., Prisutova J., Horo K. On the use of power reflection ratio and phase change to determine the geometry of a blockage in a pipe // Applied Acoustics, 2015, no. 87, pp. 190 - 197.
20. A.R. da Silva, G.P. Scavone, A. Lefebvre. Sound reflection at the open end of axisymmetric ducts issuing a subsonic meanflow: A numerical study // Journal of Sound and Vibration, 2009, vol. 327, pp. 507 - 528.
21. Иванов С.В., Могилевич Л.И., Попов В.С. Продольные волны в нелинейной цилиндрической оболочке, содержащей вязкую жидкость // Труды МАИ. 2019. № 105. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=104003>

22. Dountzev A. Waveguide ultrasonic liquid level transducer for power-generating equipment, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf, available at: https://www.hzdr.de/FWS/FWSF/mtws_00/WS4_Duncev.pdf
23. Kupnik M., Krasser E., Groschl M. Absolute transit time detection for ultrasonic gas flowmeters based on time and phase domain characteristics // IEEE Ultrasonic Symposium, 2007, pp. 142 - 145.
24. Liling Ma, Jia Liu, Junzheng Wang. Study of the accuracy of ultrasonic flowmeters for liquid // AASRI Procedia, 2012, no. 3, pp. 14 - 20.
25. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. - М.: Наука, 1984. – 403 с.