

03;08;12

Применение ультразвуковых поверхностных и нормальных волн для измерений параметров технических жидкостей.

II. Измерение плотности

© М.Б. Гитис, В.А. Чуприн

Научно-промышленная компания „Луч“,
143930 Балашиха, Московская область, Россия
e-mail: vachuprin@mail.ru

(Поступило в Редакцию 12 апреля 2011 г. В окончательной редакции 26 июля 2011 г.)

Рассмотрено влияние жидкости на поверхностные волны, распространяющиеся в волноводе вдоль его границы с жидкостью. Оценено влияние сдвиговой и объемной вязкостей жидкости на коэффициент затухания такой поверхностной волны. Показано, что при точности измерений порядка 10^{-3} влиянием жидкостей можно пренебрегать, если их сдвиговая вязкость менее $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$. При более высоких значениях вязкости необходимо введение поправок, учитывающих вклад вязких потерь в измеренный коэффициент затухания поверхностной волны. Описана методика калибровки датчика плотности для маловязких жидкостей и проведены измерения плотности растворов NaCl и сахарозы в дистиллированной воде. Эксперимент качественно согласуется с теоретическими оценками. Отмечено, что такой метод измерения продольного импеданса жидкостей позволяет использовать идентичную аппаратную реализацию и по используемому методу (импульсный), и по частотному диапазону (1–10 MHz) для измерений плотности, обеих вязкостей, скорости и коэффициента поглощения звука жидкости, которая практически не отличается от используемой в средствах неразрушающего контроля качества материала и изделий.

Введение

В работе [1] было отмечено, что использование ультразвуковых методов контроля за состоянием технологических процессов на основе контроля сдвиговой вязкости η связано с необходимостью одновременного изменения плотности технологической жидкости ρ . Поэтому, хотя в большинстве технологических процессов изменения вязкости значительно больше, чем изменения плотности, погрешность измерения последней также должна быть учтена при точных измерениях вязкости (с погрешностью лучшей, чем 0.5–1%). Более того, можно показать (см. ниже), что если параметром, характеризующим состояние технологической жидкости, является плотность, то при ее измерении в вязких жидкостях с погрешностью несколько десятых процента должно быть учтено влияние сдвиговой вязкости. Поэтому с точки зрения применения ультразвуковых методов для наблюдения за технологическими процессами практический интерес представляют методы измерений η , ρ , c (c — скорость ультразвука в жидкости), допускающие и необходимую точность измерений, и высокую степень аппаратной интеграции.

Конструкции ультразвуковых плотномеров [2], реализующих одновременные измерения продольного волнового импеданса жидкостей Z^L и скоростей звука c в них, как правило, основаны на измерении коэффициентов отражения/прохождения R^L/D^L плоской продольной волны при ее нормальном падении на границу раздела волновод (среда с известными акустическими параметрами, Z_W^L — его продольный волновой импеданс)/(исследуемая

жидкость)

$$Z^L = Z_W^L \frac{1 + R^L}{1 - R^L}$$

и на независимом измерении скорости звука в жидкости.

Теоретические оценки точности таких измерений плотности требуют специального рассмотрения каждой акустической схемы устройства и, вероятно, могут дать только порядок величины ошибок измерений, так как основываются на сильно упрощенных моделях (например, колебания источника падающей волны предполагаются поршневыми и т.д.). На таком пути можно оценить предельные значения достижимой точности измерений. Кроме того, такие оценки указывают возможные направления повышения точности измерений. В частности, очевидный и часто используемый путь повышения чувствительности измерения плотности жидкостей основан на согласовании акустических импедансов волновода и исследуемой жидкости. Однако такой подход обладает существенным недостатком, связанным с тем, что, как это следует из оценок, приведенных ниже, при согласовании импедансов сильно возрастает влияние сдвиговой вязкости на результаты измерений.

Даже без учета такого влияния достижение высокой точности измерений плотности накладывает жесткие требования на электронные схемы измерения амплитуды обрабатываемых импульсных сигналов. Так, точность измерений плотности жидкости порядка 0.1% без учета погрешностей измерений скорости звука и влияния других факторов (шумы, форма принятого сигнала и т.д.) при отношении импедансов жидкости и волновода, равном 0.5, может быть достигнута только при

использовании 12-битового аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Поскольку для высокоточных измерений скорости звука известны соответствующие технические решения [2], реализующие необходимую точность измерений в нижнем мегагерцовом диапазоне, то повышение точности измерений плотности жидкостей нуждается в поиске новых более чувствительных методов измерения продольного волнового импеданса.

Ниже излагаются результаты теоретических оценок и экспериментов по оценке возможностей применения поверхностных волн, распространяющихся в волноводе в контакте с жидкостью, для измерения ее продольного импеданса в частотном диапазоне, характерном для измерений скорости звука и сдвигового волнового импеданса жидкостей.

Теоретические оценки

Принципиальная возможность использования поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы изотропное твердое тело/жидкость, следует из их дисперсионного уравнения, которое для жидкости без потерь имеет вид [3]

$$4k^2 \sqrt{(k^2 - k_t^2)(k^2 - k_l^2)} - (2k^2 - k_t^2)^2 = i \frac{\rho k_t^4}{\rho^W} \sqrt{\frac{k^2 - k_t^2}{\chi^2 - k^2}}. \quad (1)$$

Здесь $k = \omega/c_R$ — волновой вектор поверхностной волны, c_R — скорость поверхностной волны, k_l и k_t — волновые векторы продольной и сдвиговой волн в волноводе, χ — волновой вектор продольной волны в жидкости, ρ^W — плотность волновода. В соответствии с дисперсионным уравнением вдоль границы (изотропное твердое тело)–жидкость могут распространяться 2 типа волн в зависимости от соотношений между скоростями распространяющихся волн. Если выполняются условия $c > c_R$ и $c_R < c_t$, то вдоль границы распространяется волна Стонели. В случае $c_t > c_R > c$ вдоль границы распространяется так называемая вытекающая волна, которая переходит в волну Рэлея при стремлении плотности жидкости к нулю [4]. Волна Стонели мало пригодна для измерения и продольного, и сдвигового импедансов жидкостей, так как в ней почти вся энергия колебательного движения сконцентрирована в прилегающем жидкостном слое, и поэтому параметры ее распространения в сильной мере зависят от диссипативных процессов в жидкостях. Если выполняется условие $c_t > c_R > c$, то правая часть уравнения (1) становится мнимой. Поэтому волновой вектор этой волны становится комплексным. В пренебрежении потерями энергии волны в жидкости волна в волноводе затухает по мере распространения за счет излучения упругой энергии в жидкость и относится к вытекающим поверхностным волнам [4]. В работе [3] на основе численного решения уравнения (1) были построены графики зависимостей

скорости распространения и коэффициента затухания такой волны от плотности и скорости звука в жидкости в пренебрежении ее вязкостью.

В соответствии с теоретическими оценками поверхностная волна, распространяющаяся в стальном волноводе, за счет излучения в жидкость с плотностью $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ и скоростью звука $c = 1500 \text{ м/с}$ затухает экспоненциально с коэффициентом $\alpha_{\text{rad}} \approx 0.5 \text{ 1/см}$. При этом чувствительность коэффициента затухания к изменению плотности жидкости оказывается очень высокой. Например, для стального волновода и указанных выше параметров жидкости при изменении плотности жидкости на 1% коэффициент затухания становится равным $\alpha_{\text{rad}} = 0.504 \text{ 1/см}$. В результате если длина поверхности контакта волновод/жидкость $l_{\text{cont}} = 5 \text{ см}$, то 1%-ное изменение плотности приводит к изменению амплитуды волны на 25%, что существенно превышает изменения коэффициента отражения продольных волн от границы раздела волновод/жидкость при нормальном падении. Действительно, коэффициент отражения продольной волны при ее нормальном падении на границу раздела, равный отношению амплитуд отраженной и падающей волн в пренебрежении потерями упругой энергии, в обеих средах записывается как

$$R^L = \frac{Z_W^L - Z^L}{Z_W^L + Z^L}, \quad (2)$$

где Z_W^L и Z^L — продольный волновой импеданс волновода и жидкости соответственно. Отсюда находим, что для указанной выше комбинации волновод/жидкость изменение плотности жидкости на 1% приводит к изменению коэффициента отражения на 0.2%. Чтобы повысить чувствительность измерений, необходимо согласование импедансов волновода и жидкости: при условии $Z_W^L = 2Z^L$ 1%-ное изменение плотности ведет к изменению R^L на 1.3%, и только, если $Z_W^L = 1.1Z^L$, то изменение R^L составляет $\sim 11\%$. Попутно отметим, что, как правило, твердые тела с малыми значениями Z_W^L обладают большим затуханием звука, что изменяет рассчитанный из соотношения (2) коэффициент отражения [4].

Однако оценки погрешностей измерений плотности жидкостей как на поверхностных (с использованием формулы (1)), так и объемных волнах с использованием формулы (2) не учитывают влияния вязкости жидкостей. Это обстоятельство становится очень важным при их практической реализации, так как жидкости, используемые в технологических процессах, могут обладать достаточно большими как сдвиговыми, так и объемными вязкостями.

Вообще говоря, имеется 2 канала влияния вязких свойств жидкостей на поверхностную волну в волноводе. С одной стороны, сдвиговая и объемная вязкости дают вклад в тензор напряжений в вязкой жидкости σ_{ik} , что, в свою очередь, влияет на граничные условия и, следовательно, на распространение поверхностной волны. С другой стороны, продольная компонента смещения в

поверхностной волне вызывает периодическое тангенциальное смещение границы раздела по отношению к неподвижной жидкости. В результате в последней возбуждаются вязкие волны, что проявляется в возрастании затухания поверхностной волны.

Рассмотрим сначала влияние изменений граничных условий на распространение поверхностной волны. Следуя [3], запишем скалярный φ^W и векторный ψ^W потенциалы для поверхностной волны, распространяющейся в волноводе в направлении x , в виде

$$\begin{aligned}\varphi^W &= \varphi_0^W \exp[i(kx - \omega t) - qz]; \\ \psi^W &= \psi_0^W \exp[i(kx - \omega t) - sz]; \\ q &= \sqrt{k^2 - k_t^2}; \quad s = \sqrt{k^2 - k_t^2},\end{aligned}\quad (3)$$

где ось z направлена вглубь прямоугольного волновода. Так как в жидкости распространяется только продольная волна, которая сопровождает поверхностную волну, то скалярный потенциал φ^L ищем в виде

$$\varphi^L = \varphi_0^L \exp[i(kx - z\sqrt{\chi^2 - k^2})],\quad (4)$$

а векторный потенциал приравниваем нулю $\psi^L = 0$.

Оба потенциала должны удовлетворять граничным условиям равенства нормальных смещений в жидкости u_z^L и волноводе u_z^W , равенства нормальных и касательных компонент тензора напряжений в жидкости σ_{zz}^L , σ_{xz}^L и в волноводе σ_{zz}^W , σ_{xz}^W , т. е.

$$\frac{\partial \varphi^W}{\partial z} + \frac{\partial \psi^W}{\partial x} = \frac{\partial \varphi^L}{\partial z},\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\lambda^W \left(\frac{\partial^2 \varphi^W}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi^W}{\partial z^2} \right) + 2\mu^W \left(\frac{\partial^2 \varphi^W}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi^W}{\partial x \partial z} \right) \\ = \left(\rho c^2 - i\omega \left(\xi + \frac{4\eta}{3} \right) \right) \left(\frac{\partial^2 \varphi^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi^L}{\partial z^2} \right),\end{aligned}\quad (6)$$

$$\mu^W \left(2 \frac{\partial^2 \varphi^W}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \psi^W}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi^W}{\partial z^2} \right) = -2i\omega\eta \frac{\partial^2 \varphi^L}{\partial x \partial z},\quad (7)$$

где λ^W и μ^W — постоянные Ламэ для волновода, ξ — объемная вязкость жидкости. В уравнениях (6) и (7) для тензора напряжений вязкой жидкости использовано известное выражение [4]

$$\begin{aligned}\sigma_{ik} &= \left(\rho c^2 - i\omega\xi + \frac{2}{3}i\omega\eta \right) \delta_{ik} \frac{\partial^2 u_r^L}{\partial x_r} \\ &\quad - i\omega\eta \left(\frac{\partial u_i^L}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k^L}{\partial x_i} \right),\end{aligned}\quad (8)$$

где $u^L = \partial \varphi^L / \partial x_i$ — i -компонента смещения в продольной волне в жидкости. Подставив (3), (4) в граничные условия, находим в первом приближении по малому

параметру $\theta = \omega\eta/\mu^W$ дисперсионное уравнение для поверхностной волны

$$\begin{aligned}4k^2 \sqrt{(k^2 - k_t^2)(k^2 - k_t^2)} \left(1 + 2i \frac{k^2 \theta}{k^2 + s^2} \right) \\ \times \left(1 + 2i \frac{k_t^2 \theta}{k^2 + s^2} \right) - (2k^2 - k_t^2)^2 \left(1 + 2i \frac{k^2 \theta}{k^2 + s^2} \right) \\ = i \frac{\rho k_t^4}{\rho^W} \sqrt{\frac{k^2 - k_t^2}{\chi^2 - k^2}} \left(1 + \frac{i\omega(\xi + 4\eta/3)}{\rho c^2} \right).\end{aligned}\quad (9)$$

Численные оценки показывают, что во многих практически интересных случаях влиянием вязкости жидкости на коэффициент затухания поверхностной волны, связанный с излучением в жидкость, можно пренебречь. Так, для пары (стальной волновод)/жидкость с вязкостью $\leq 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ рассчитанное отношение коэффициента затухания поверхностной волны, обязанного вязким потерям в жидкости α_{η}^W , к коэффициенту затухания вследствие излучения α_{rad} на частоте 2.5 MHz не превышает $(3-5) \cdot 10^{-4}$, и процедура обработки результатов измерений может базироваться на дисперсионном уравнении (1). В случае сильновязких жидкостей расчет плотности жидкостей с высокой точностью (порядка нескольких десятых процента) усложняется, так как для численных расчетов на основе дисперсионного уравнения (9) необходимы численные значения обеих вязкостей в жидкости. Последние могут быть вычислены из экспериментальных значений коэффициента поглощения звука в жидкости [1], что означает необходимость введения дополнительного измерительного канала.

Другой механизм, ведущий к потерям энергии поверхностной волны, распространяющейся в волноводе в контакте с жидкостью, и не учитываемый условием $\psi^L = 0$, связан с возбуждением в последней вязких волн. При гармоническом движении плоской твердой поверхности в своей плоскости со скоростью $v = v_m \cos \omega t$ жидкость приходит в движение со скоростью v^L [5]:

$$v^L = v_m \exp \left[i \left(-\frac{z}{\delta} - \omega t \right) + \frac{z}{\delta} \right]; \quad \delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega\rho}}.\quad (10)$$

Здесь, как и выше, начало координат совмещено с границей раздела, и ось z , перпендикулярная границе, направлена вглубь волновода. Соответственно диссипация энергии в единицу времени, отнесенная к единице площади колеблющейся поверхности, может быть рассчитана, как произведение силы трения $\sigma_{\text{тр}}$ на колебательную скорость поверхности [5].

Компоненты колебательной скорости поверхности, прилегающей к жидкости, для поверхностной волны, распространяющейся в волноводе вдоль границы с этой жидкостью, могут быть вычислены из горизонтальной u_x

компоненты смещения, рассчитанной в [3]

$$u_x = Ak \left[\exp \left(-z \sqrt{k^2 - k_t^2} \right) - \frac{2\sqrt{(k^2 - k_t^2)(k^2 - k_l^2)}}{2k^2 - k_t^2} \right. \\ \left. \times \exp \left(-z \sqrt{k^2 - k_t^2} \right) \exp(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}) \right], \quad (11)$$

где A — константа, определяемая условиями возбуждения и упругими свойствами волновода.

Так как касательные компоненты смещений соприкасающихся поверхностей жидкости и волновода равны $v^L(z=0) = \partial u_x / \partial t(z=0)$, сила трения, действующая на твердую поверхность в соответствии с (8) равна

$$\sigma_{zx} = \sqrt{\frac{\omega \eta \rho}{2}} (i - 1) v^L(z=0). \quad (12)$$

Тогда для среднего по времени значения энергии $\overline{\Delta E}$, теряемой объемом $\Delta x b h$ (b и $h \gg 2\pi/k$ — соответственно ширина и толщина прямоугольного волновода) вследствие трения его поверхности о жидкость, находим

$$\overline{\Delta E} = \frac{1}{2} A^2 k^2 \omega^2 \sqrt{\frac{\omega \eta \rho}{2}} \left(1 - \frac{2qs}{2k^2 - k_t^2} \right)^2 b \Delta x. \quad (13)$$

Среднее по времени значение полной энергии волны \bar{E} равно удвоенной средней кинетической энергии [6]. Для рассматриваемого объема

$$\bar{E} = \frac{\rho^W}{2} \int_0^h (v_x^2 + v_z^2) b \Delta x dz \\ = \frac{\rho^W}{2} A^2 \omega^2 q^2 \left[\frac{1}{q} + \frac{4(qs + k^2)}{(2k^2 - k_t^2)(q + s)} + \frac{4(k^2 q^2 + k^2 s^2 + k_t^2 k^2)}{2(2k^2 - k_t^2)^2 q} \right] b \Delta x. \quad (14)$$

Соответственно коэффициент затухания поверхностной волны α_η^L , связанный с возбуждением ею вязких волн в жидкости, рассчитывается как [6]

$$\alpha_\eta^L = \alpha_{\text{fric}} = \frac{|\overline{\Delta E}|}{2v\bar{E}}. \quad (15)$$

Численные оценки показывают, что $\alpha_\eta^L \gg \alpha_\eta^W$. Поэтому его вклад в измеряемый коэффициент затухания может оказаться существенным даже при измерении плотностей средневязких жидкостей ($\eta \approx 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$). Так, коэффициент затухания поверхностной волны, распространяющейся в стальном и алюминиевом волноводах, в жидкостях с вязкостью $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ на частоте 2.5 MHz составляет примерно 10^{-3} и 10^{-2} 1/cm соответственно. Поэтому целесообразно для измерений плотности жидкостей использовать волноводы с высокими значениями плотности и скорости звука.

Попутно отметим, что влияние вязкости жидкости на результаты измерений плотности может стать существенным и при измерениях плотности на продольных волнах при нормальном падении. Действительно, потенциалы волн в волноводе и жидкости при нормальном падении продольной волны должны быть записаны в виде

$$\varphi_1^W = A_1 \exp(ik_l z), \quad \varphi_2^W = A_2 \exp(-ik_l z), \\ \psi_1^W = \psi_2^W = 0, \quad \varphi_1^L = A_3 \exp(i\chi z), \quad (16)$$

где $\varphi_1^W, \varphi_2^W, \varphi_1^L$ — скалярные потенциалы падающей и отраженной волн в волноводе и прошедшей волны в жидкости. Подставляя (16) в граничные условия, находим

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\rho^W c_l - \rho c}{\rho^W c_l + \rho c} \frac{1 + i\chi \frac{\xi + 4\eta/3}{\rho^W c_l - \rho c}}{1 - i\chi \frac{\xi + 4\eta/3}{\rho^W c_l + \rho c}}. \quad (17)$$

Численные оценки показывают, что если измерения производятся на частоте 2.5 MHz , то поправкой к модулю коэффициента отражения из-за влияния вязкости для жидкостей с $\eta \leq 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ в случае стального волновода можно практически всегда пренебречь, а оценка изменения фазы коэффициента отражения дает $\sim 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$. Однако, как отмечалось выше, влияние плотности жидкости на коэффициент отражения в этом случае сравнительно невелико. Согласование же волновых сопротивлений волновода и жидкости, предпринимаемое для повышения чувствительности измерений плотности, в соответствии с (17) существенно увеличивает влияние вязкости жидкости на измеряемые на фазу и модуль коэффициент отражения.

Эксперимент

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Поверхностные волны возбуждались и принимались с помощью наклонных ультразвуковых преобразователей 1 и 2 на частоту 2.5 MHz , приклеенных к стальной пластине 3 размерами $70 \times 30 \times 15 \text{ mm}$. Пластина герметично вставлялась в сосуд 4. Последний заполнялся исследуемыми жидкостями. Таким образом,

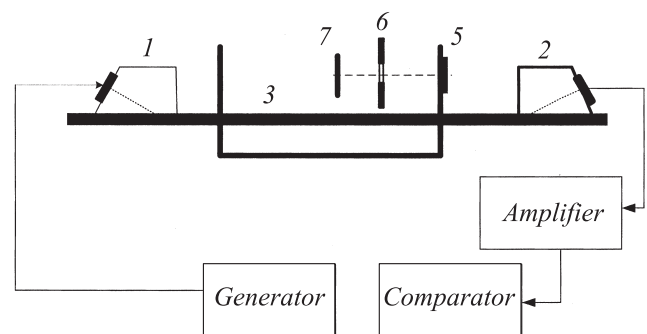


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки (пояснения в тексте).

во всех измерениях обеспечивалось постоянное расстояние 4 см, на котором осуществлялось взаимодействие поверхностной волны с жидкостями. Дополнительный плоский преобразователь 5 с отражателями 6 и 7 служил для измерений скорости звука в жидкости. Возбуждение ультразвуковых импульсов и методика измерений амплитуды принимаемых сигналов аналогичны [1].

Процедура измерения неизвестной плотности жидкости, если предварительно измерены плотность волновода, продольная и сдвиговая скорости звука в волноводе, сводится к измерению коэффициента затухания α_{exp} и скорости c_{Rexp} поверхностных волн, распространяющихся вдоль границы волновод/жидкость, а также к измерению скорости звука c_{exp} в жидкости. Однако непосредственный расчет ρ из измеренных α_{exp} , c_{exp} , c_{Rexp} в соответствии с теоретическими дисперсионными уравнениями содержит ряд погрешностей, обусловленных отличием экспериментальных условий от идеализированных, использованных при теоретическом анализе. Это предположение, что поверхностная волна плоская, отсутствие шероховатости поверхности и затухания в волноводе, не говоря о необходимости введения дифракционных поправок в измеренные скорости звука в волноводе. Поэтому акустический тракт устройства предварительно калибровался.

Теоретические оценки влияния вязкости на параметры распространяющейся волны, сделанные выше, показывают, что, если вязкость жидкостей не превышает 0.01–0.015 Па·с и волновод — стальной, вкладом вязких потерь можно пренебречь. Тогда из обработки результатов численного решения дисперсионного уравнения (3) следует [3], что для плотностей $\rho/\rho^W < 0.4$ и $c_t/c = 2-3$ зависимость $\alpha_{\text{rad}}(\rho/\rho^W)$ может быть хорошо аппроксимирована линейной функцией, а изменение скорости поверхностной волны для различных жидкостей не превышает 0.5%. Последнее обстоятельство дает возможность полагать, что дифракционные эффекты в волноводе и потери в материале волновода остаются постоянными для таких жидкостей.

Для учета возможных отклонений реальных зависимостей $\alpha_{\text{rad}}(\rho/\rho^W, c_t/c)$ от предсказываемых теорией зависимости $\alpha_{\text{rad}}(\rho/\rho^W) \cdot (2\pi/k)$ аппроксимировали функцией $a_1(\rho/\rho^W) + a_2(\rho/\rho^W)^2$, в которой коэффициенты a_1 и a_2 рассматривались, как функции отношения c_t/c :

$$\begin{aligned} a_1 &= a_{11}(c_t/c) + a_{12}(c_t/c)^2, \\ a_2 &= a_{21}(c_t/c) + a_{22}(c_t/c)^2. \end{aligned} \quad (18)$$

Соответственно численные значения коэффициентов $a_{ik}(i, k = 1, 2)$ могут быть рассчитаны, если измерены амплитуды принятых сигналов при контакте поверхностной волны с четырьмя жидкостями с известными плотностями и скоростями звука.

Скорость звука в жидкости измерялась стандартным эхо-импульсным методом на частоте 2.5 МГц с использованием отражателей 6 и 7 (рис. 1), находящихся на известных расстояниях от преобразователя. При этом

ближний отражатель представляет собой кольцо, а дальний — диск. Система отражатели–преобразователь была коаксиальной. Методика измерения временного интервала описана в работе [1]. Аппаратурная погрешность измерения временного интервала составляла $\pm(5-10)$ нс. Такая точность измерений оказывается вполне достаточной, так как в соответствии с расчетами, проведенными в работе [3], изменение коэффициента a_1 при изменении свойств жидкости невелико (например, при изменении скорости на 50% этот коэффициент изменяется на 5–10%).

В качестве жидкостей для калибровки были использованы 2 группы жидкостей. Первую группу составляли жидкости с малой вязкостью — дистиллированная вода и 3 раствора NaCl в дистиллированной воде: 3 весовых % ($\rho = 1.0268 \text{ g/cm}^3$), 8 весовых % ($\rho = 1.0559 \text{ g/cm}^3$), 12 весовых % ($\rho = 1.0857 \text{ g/cm}^3$). Табличное значение вязкости 10%-ного раствора NaCl в дистиллированной воде $\eta = 1.19 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [7,8]. Во вторую группу входили дистиллированная вода и 3 раствора сахарозы в дистиллированной воде, обладающие значительно большими вязкостями [7]: 30% весовых $\rho = 1.12338 \text{ g/cm}^3$, 40% весовых $\rho = 1.17651 \text{ g/cm}^3$, $\eta = 6.167 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ и 60% весовых $\rho = 1.28661 \text{ g/cm}^3$, $\eta = 58.49 \cdot 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. Реальные плотности используемых растворов, измеренные с помощью пикнометра с погрешностью $\pm 0.1\%$, отличались не более чем на 0.5% от табличных значений.

Обработка результатов измерения показала, что чувствительность метода, характеризующая как отношение изменения амплитуды выходного сигнала к изменению плотности, составляет $(8 \pm 0.5) \text{ mV/вес.}\%$. Затем были измерены α_{exp} и рассчитаны ρ для растворов 50 весовых % сахарозы, 16 весовых % NaCl в дистиллированной воде и ацетона.

Отличия измеренных значений, найденных как средние значения из 10 измерений, от значений, измеренных пикнометром, составляли $\sim 0.8\%$. Можно полагать, что относительно высокая погрешность измерений, заметно превышающая оценки, следующие из теории, обязана двум факторам. Первый фактор связан с ошибкой измерений максимального значения электрического импульса по методу, реализованному в установке. Несомненно, применение АЦП с высоким разрешением может существенно уменьшить эту составляющую ошибок измерений. Другим мешающим фактором является возбуждение различных типов волн, в частности подповерхностных сдвиговых волн, имеющее место при использованном методе генерирования поверхностной волны. Скорость подповерхностной сдвиговой волны превышает скорость поверхностной волны всего на единицы процентов и, несмотря на принятые меры (выбор общей длины волновода, оптимизация угла падения продольной волны в призме, электрическое демпфирование колебаний пьезопластины), полностью исключить возможность влияния этого сигнала на информативную часть принимаемого сигнала, образованного поверхностной волной,

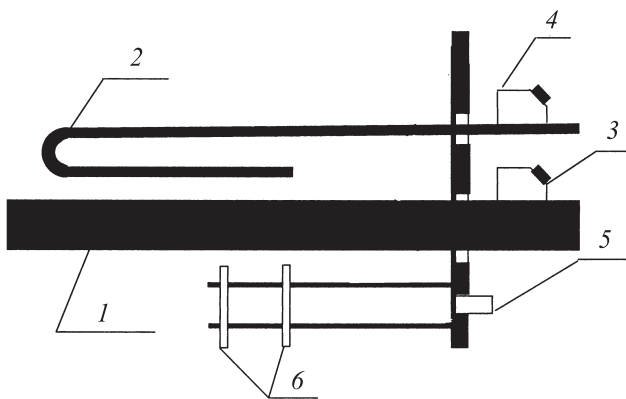


Рис. 2. Пример конструкции блока преобразователей для одновременного измерения вязкости и плотности жидкости (пояснения в тексте).

не удалось. Поэтому можно полагать, что оптимизация способов возбуждения поверхностной волны и геометрии акустического тракта с целью уменьшения амплитуд мешающих сигналов должны уменьшить погрешность измерений.

Что касается сильно вязких жидкостей, то измеренная плотность глицерина, рассчитанная из α_{rad} без учета потерь, связанных с возбуждением вязких волн, равна 1.31 г/см^3 , что отличается от табличного значения на 4%. Учет вклада вязких волн в соответствии с формулами (13), (14) с использованием табличного значения вязкости уменьшает отличие измеренного значения плотности от табличного до 1.1%. Этот результат, вероятно, свидетельствует о недостаточной точности теоретических оценок вклада вязких потерь и необходимости его экспериментального определения, например, по методу, рассмотренному в [2].

Заключение

Применение волн, распространяющихся в твердом теле вдоль поверхности, имеющей акустический контакт с жидкостью, позволяет достичь высокой точности измерений продольного и сдвигового импедансов жидкости непосредственно в ходе технологического процесса. На базе измеренных импедансов, используя дополнительные измерения скорости звука в жидкости, могут быть рассчитаны с точностью, достаточной для многих практических применений, плотность и сдвиговая вязкость исследуемых жидкостей. Все методы измерений являются импульсными и проводятся в частотном диапазоне 1–10 МГц. Поэтому аппаратная реализация всех волн измерений, являясь полностью идентичной, не требует специфических технических решений и практически не отличается от используемой в приборах неразрушающего контроля качества материалов и изделий. Пример акустической конструкции, в которой могут быть проведены все 3 вида измерений, представлен на рис. 2.

Здесь 1 и 2 — волноводы, в которых распространяются поверхностная и нормальная волны, 3 и 4 — наклонные преобразователи, 5 — плоский преобразователь для возбуждения объемных волн и 6 — система отражателей для него.

Если описанные выше измерения плотности и сдвиговой вязкости дополнить измерениями коэффициента поглощения звука в жидкости, что не требует каких-либо изменений в аппаратной реализации, то, комбинируя все 4 измерения, можно рассчитать также и объемную вязкость жидкости. Иными словами, появляется возможность непосредственно во время технологического процесса контролировать параметр, связанный с кинетикой технологических процессов, происходящих на молекулярном уровне [9].

Список литературы

- [1] Гутис М.Б., Чуприн В.А. // ЖТФ. 2012. Т. 82. Вып. 5. С. 93–99.
- [2] Hauptmann P., Hoppe N., Püttmer A. // Measurement Science and Technology. 2002. Vol. 13. P. R73–R83.
- [3] Викторов И.А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966. 168 с.
- [4] Бреховских Л.М., Годин О.А. Акустика слоистых сред. М.: Наука, 1989. 416 с.
- [5] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.
- [6] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. М.: Наука, 1987. 248 с.
- [7] Ulmann's, Encyclopedia of Industrial Chemistry. Berlin: VCH. 1994. Vol. A25. P. 350–351.
- [8] Gmelin L. Handbook of inorganic chemistry. Berlin: VCH. 1993. Vol. 12A. P. 429.
- [9] Михайлов И.Г., Соловьев В.А., Сырников Ю.П. Основы молекулярной акустики. М.: Наука, 1964. 514 с.