

## КАМЕРТОННЫЙ ВИБРОВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЖИДКОСТЯХ

© 2015 Б.А. Соломин<sup>1</sup>, А.М. Низаметдинов<sup>1,2</sup>, А.А. Черторийский<sup>1</sup>, М.Л. Конторович<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup> Ульяновский государственный технический университет

Поступила в редакцию 16.03.2015

Описан вибровискозиметрический датчик с колебательной системой камертонного типа. Рассмотрена возможность его применения для исследования термостимулированных межмолекулярных процессов в жидкостях. Показано, что оптимальная настройка камертона позволяет минимизировать влияние способа крепления датчика на его метрологические характеристики.

*Ключевые слова:* вискозиметр, камертон, вибровискозиметрический датчик, межмолекулярное взаимодействие, чувствительность, термостимулированные процессы.

Изменение энергии межмолекулярного взаимодействия при монотонном изменении температуры жидкости (термосканировании) приводит, зачастую, к образованию или разрушению различных надмолекулярных структур, т.е. к процессам структурообразования жидкости. Исследование динамики и кинетики подобных процессов представляет несомненный интерес для специалистов по физике жидкостей, физической и коллоидной химии, нефтехимии, химмотологии.

Интенсивность межмолекулярных взаимодействий в жидкости интегрально можно оценить по текущей сдвиговой (динамической) вязкости. Для исследования зависимости сдвиговой вязкости от температуры при ее монотонном быстром изменении наиболее пригодны вибровискозиметрические датчики [1, 2] с плоским или сферическим зондом. Такие датчики обеспечивают непрерывность и локальность измерения вязкости, имеют достаточно высокую чувствительность и быстродействие, могут быть размещены в пробах малого объема [3].

Уравнение вынужденных колебаний малой амплитуды для механической колебательной системы с одной степенью свободы имеет вид:

$$F(t) = M \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} + r \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + kx, \quad (1)$$

где  $M$  – приведенная масса колебательной систе-

мы,  $r$  – механическое сопротивление колебательной системы,  $k$  – приведенная жесткость колебательной системы,  $x$  – отклонение колебательной системы от положения равновесия,  $F(t)$  – вынуждающая сила, приложенная к колебательной системе. Данное уравнение достаточно хорошо описывает поведение вибровискозиметра, работающего в режиме вынужденных колебаний с малой амплитудой [1].

При использовании в качестве зонда вискозиметра шарика диаметром  $d$ , погруженного в жидкость с динамической вязкостью  $\eta$ , плотностью  $\rho$ , и достаточно удаленного от стенок кюветы, на основании решения уравнения Навье-Стокса можно найти силу сопротивления  $F_c$ , действующую на колеблющийся с частотой  $\omega$  шарик [4, 5]:

$$F_c = r_3 \cdot \frac{\partial x}{\partial t} + m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2}, \quad (2)$$

где  $r_3$  – механическое сопротивление зонда в жидкости,  $m$  – присоединенная масса жидкости. При этом механическое сопротивление и присоединенная масса выражаются следующим образом:

$$r_3 = 3\pi\eta d \left[ 1 + \frac{d}{2} (\omega\rho/2\eta)^{1/2} \right], \quad (3)$$

$$m = \frac{\pi}{12} d^3 \left[ \rho + 9 \cdot \frac{(2\eta\rho/\omega)^{1/2}}{d} \right], \quad (4)$$

Параметры  $r_3$  и  $m$  могут быть определены в результате экспериментальных измерений резонансной частоты  $\omega$ , амплитуды  $A$  и фазы  $\varphi$  вынужденных колебаний зонда на воздухе и при его погружении в жидкость [6]. В этом случае динамическая вязкость и плотность жидкости вычисляются путём одновременного решения уравнений (3) и (4). Необходимо отметить, что это возможно только при сферической форме зонда.

*Соломин Борис Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник.*

*E-mail: solomin.boris@yandex.ru*

*Низаметдинов Азат Маратович, аспирант Ульяновского государственного технического университета.*

*E-mail: anizametdinov@yandex.ru*

*Черторийский Алексей Аркадьевич, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе.*

*E-mail: a-tchertor@yandex.ru*

*Конторович Михаил Леонидович, ведущий инженер.*

*E-mail: kantor2@yandex.ru*

Точность определения динамической вязкости и плотности с помощью вибровискозиметра существенно зависит от его конструктивного исполнения, в том числе от эффективности его виброизоляции от внешней среды.

Для анализа влияния конструкции на параметры вибровискозиметра рассмотрим его упрощенную механическую модель (рис. 1), включающую в себя массивное основание массой  $M$  с возбудителем колебаний (например, электромагнитным), зонд массой  $m$  и упругую безмассовую связь  $k$  между ними.  $Z$  – комплексное механическое сопротивление связи между основанием и землей (бесконечной массой).

Рассмотрим случай, когда  $Z$  бесконечно велико, т.е. связь между основанием и землей отсутствует (вибродатчик находится в свободном пространстве).

Пусть со стороны основания на зонд действует сила  $F_M = F_0 \cdot \sin(\omega t)$ . При этом со стороны зонда на основание будет встречно действовать такая же сила  $F_m$ . В этом случае при движении зонда с ускорением  $a_m$  основание вибродатчика будет двигаться с ускорением  $a_M = \frac{m}{M} \cdot a_m$ .

Под действием данной гармонической силы  $F_M$  зонд совершает механические колебания амплитудой  $h_m$  и частотой  $\omega$  относительно положения равновесия:  $x_m(t) = h_m \cdot \sin(\omega t)$ .

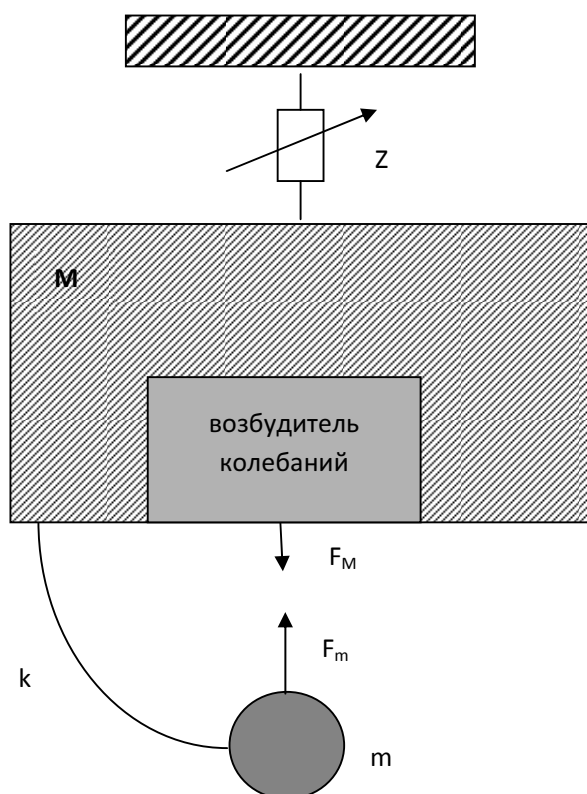


Рис. 1. Упрощенная механическая модель вибровискозиметра

В этом случае максимальная скорость его движения  $v_m = \omega \cdot h_m$ .

Основание также совершает механические колебания. При этом с учетом закона сохранения количества движения максимальная скорость основания составит  $v_M = \frac{m}{M} \cdot v_m$  с амплитудой колебаний  $h_M = \frac{m}{M} \cdot h_m$ .

С учетом того, что кинетическая энергия пропорциональна массе колеблющегося тела и квадрату его скорости, получаем отношение кинетической энергии основания  $E_M$  к кинетической энергии зонда  $E_m$ :

$$\frac{E_M}{E_m} = \frac{m}{M}. \quad (5)$$

Таким образом, при конечном значении массы основания общая энергия возбудителя будет перераспределяться между основанием и зондом обратно пропорционально отношению их масс. При процесс передачи энергии от возбудителя на основание вибродатчика прекращается, и вся энергия передается вибрирующему зонду.

В реальных условиях вибродатчик не находится в свободном пространстве, а его основание связано с бесконечной массой (землей) через промежуточные конструктивные элементы: вибро- и термоизоляции, внешний корпус, позиционер.

Данные элементы, в общем случае, обладают как упругими (реактивными), так и вибропоглощающими (активными) свойствами. Величина конечного механического сопротивления  $Z$  будет определять потери энергии  $E_M$  возбудителя механических колебаний. Механическое сопротивление может существенно зависеть от температуры окружающей среды, нестабильности во времени механических характеристик элементов вибро- и термоизоляции, конструктивных соединений. Указанные обстоятельства приводят, при постоянстве возбуждающей силы  $F_M$ , к нестабильности амплитуды  $h$  колебаний зонда во времени, т.е. ограничивают разрешающую способность и чувствительность вибродатчика.

Улучшить метрологические характеристики вибродатчика можно, если уменьшить передачу энергии  $E_M$  на основание вибродатчика. Этого можно достичь либо за счет значительного увеличения массы основания в рассмотренной механической модели, либо за счет введения дополнительного колебательного звена, соединенного с основанием вибродатчика.

Рассмотрим подробнее вторую возможность, которая схематически показана на рис. 2 для случая вибродатчика в свободном пространстве.

В отличие от рис. 1 здесь введен дополнительный элемент – «компенсатор» с массой  $m_1$  и упругой безмассовой связью  $k_1$  между компенсатором и основанием  $M$ . Компенсатор находится вне зоны действия возбудителя. Резонансные частоты колебаний зонда  $\omega_m$  и компенсатора  $\omega_{m1}$

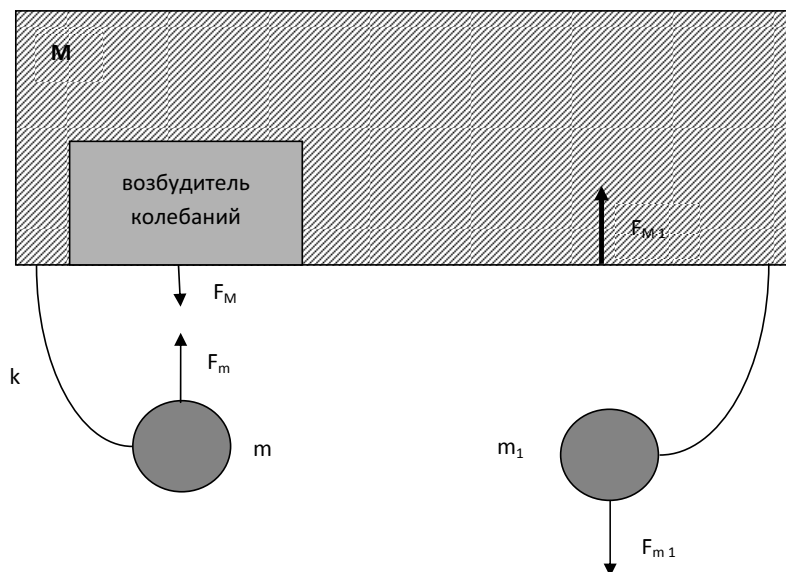


Рис. 2. Колебательная система с компенсатором

равны, соответственно:  $\omega_m = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,  $\omega_{m1} = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}$ .

Для компенсации необходимо выполнение условия равенства резонансных частот  $\omega_m = \omega_{m1} = \omega$ . В этом случае при колебаниях зонда под действием возбуждающей силы  $F_M$  с амплитудой  $h_m$  и частотой  $\omega$  компенсатор, за счет колебаний основания вибродатчика, также начнет колебаться с данной частотой и установившейся амплитудой  $h_{m1}$ . При этом колебания зонда и компенсатора происходят в противофазе.

Найдем результирующую силу, действующую на основание при установившихся колебаниях зонда и компенсатора:

$$F_{M\Sigma} = m \cdot a_m - m_1 \cdot a_{m_1}, \quad (6)$$

где  $a_m = h_m \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ ,  $a_{m_1} = -h_{m_1} \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ .

При  $m \approx m_1$  получим:

$$F_{M\Sigma} = M \cdot a_{M\Sigma} = m \cdot (a_m - a_{m_1}) = F_M \cdot \frac{\Delta h}{h}, \quad (7)$$

где  $\Delta h = h - h_1$ ;

При высокой механической добротности компенсатора на резонансной частоте  $\Delta h < h$ . Используя выражение (7) можно вычислить максимальную скорость колебательного движения основания  $\mathcal{G}_{M\Sigma}$ :

$$\mathcal{G}_{M\Sigma} = \frac{m}{M} \cdot \mathcal{G}_m \cdot \frac{\Delta h}{h} = \mathcal{G}_M \cdot \frac{\Delta h}{h}, \quad (8)$$

При этом максимальная кинетическая энергия движения основания  $E_{M\Sigma}$  будет равна:

$$E_{M\Sigma} = \frac{M \cdot \mathcal{G}_{M\Sigma}^2}{2} = \frac{m}{M} \cdot \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 \cdot E_m, \quad (9)$$

Из (5) и (9) получим:

$$\frac{E_{M\Sigma}}{E_M} = \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 < 1, \quad (10)$$

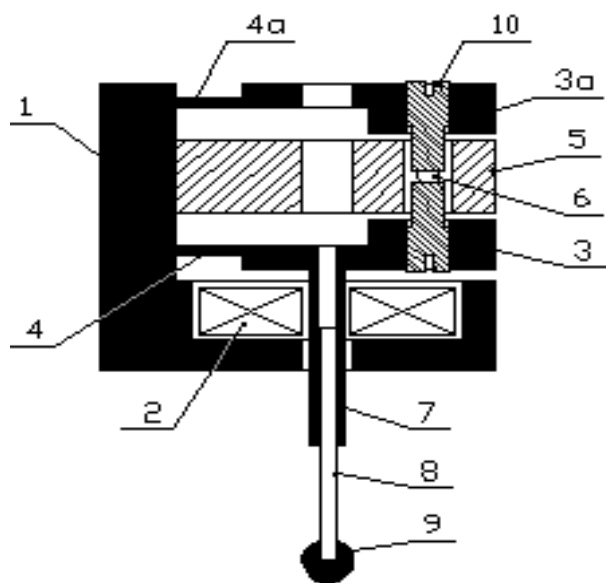
Таким образом, при использовании компенсатора передача колебательной энергии от возбуждателя на основание вибродатчика резко уменьшается, при этом пропорционально уменьшается влияние на амплитуду колебаний зонда и неустойчивости комплексного механического сопротивления связи  $Z$  между основанием  $M$  и землей. Результатом является улучшение стабильности амплитуды колебаний зонда и существенное повышение чувствительности вибровязкозиметрического датчика к изменениям вязкости исследуемой жидкости.

Конструктивно подобное решение может быть реализовано путем использования акустического камертона, к одному из плеч которого крепится вибронд, а второе плечо камертона выполняет функцию компенсатора.

Экспериментально реализованная конструкция колебательной системы камертонного датчика с электромагнитным возбуждателем колебаний, оптическим датчиком положения зонда и терморезистивным измерителем температуры зонда в несколько упрощенном виде представлена на рис. 3 [7].

При настройке обоих плеч камертона на одинаковую резонансную частоту передача энергии колебаний от них на основание резко уменьшается, что снижает влияние способа закрепления вибровязкозиметрического датчика во внешнем корпусе на добротность колебательной системы, и уменьшает уровень шумов в выходном сигнале вибродатчика.

Для формирования выходного сигнала вибродатчика используется оптический датчик



**Рис. 3.** Вибровискозиметрический датчик:

1 – основание вибровискозиметрического датчика; 2 – обмотка электромагнита возбуждителя; 3 – ферромагнитный якорь (груз рабочего плеча камертона); 4 – упругий элемент рабочего плеча камертона; 4а – упругий элемент компенсирующего плеча камертона; 5 – консоль оптического датчика положения плеч камертона; 6 – оптический зазор между плечами камертона; 7 – элемент крепления штока вибротермозонда; 8 – шток (стеклянный капилляр) вибротермозонда; 9 – вибротермозонд (шарик со впаянной термопарой); 10 – винты регулировки оптического зазора

положения. Датчик положения размещен на консоли 5 внутри колебательной системы вибровискозиметрического датчика и состоит из излучателя и фотоприемника (на рисунке не показаны). Световой поток излучателя поступает на фотоприемник через оптический зазор 6, изменяющийся при отклонении плеч камертона от положения равновесия. В результате происходит амплитудная модуляция светового потока, которая преобразуется в переменную составляющую выходного сигнала фотоприемника. При этом в случае малых значений амплитуды колебаний вибротермозонда амплитуда переменной составляющей выходного сигнала фотоприемника оказывается прямо-пропорциональной амплитуде данных колебаний. Чувствительность датчика к положению рабочего либо компенсирующего плеча камертона регулируется положением винтов 10, перекрывающих оптический канал датчика. Наличие двух регулировочных винтов облегчает процедуру настройки камертона в резонанс и позволяет независимо определять механическую добротность каждого из плеч камертона. Данный вариант конструктивного исполнения оптического датчика обеспечивает повышение его чувствительности и позволяет автономно на-

страивать колебательную систему до закрепления ее внутри вибровискозиметрического датчика.

В данной конструкции колебательной системы геометрия рабочего и компенсирующего плеча камертона существенно отличается в связи с необходимостью крепления к рабочему плечу штока 8 с вибротермозондом 9. В результате, если выполнить оба плеча идентичными, масса рабочего плеча окажется выше. Для достижения эффекта компенсации необходимо иметь возможность понизить до требуемого значения резонансную частоту колебаний компенсирующего плеча. В данной конструкции это может быть достигнуто либо уменьшением толщины элемента 4а, либо (проще всего) путем увеличения массы элемента 3а через жесткое закрепление на нем дополнительных грузов.

Колебательная система монтируется во внутреннем термостатированном корпусе. Окруженный слоем термоизоляции внутренний корпус вибровискозиметрического датчика помещен в наружный корпус. Наружный корпус закрепляется на устройстве позиционирования, обеспечивающем возможность во время измерений размещать зонд вибротермозонда в заданном месте внутри кюветы с исследуемой жидкостью.

При измерении амплитуды сигнала вибровискозиметра используется принцип синхронизации моментов выборок измерительного АЦП с фазой колебаний зонда вибровискозиметра. Возможность реализации данного метода измерений связана с тем, что сигнал на выходе вибровискозиметра является гармоническим, и частоту данного сигнала можно считать неизменной в течение нескольких периодов. Моменты выборок выходного сигнала вибровискозиметра выбираются так, чтобы они соответствовали максимумам его амплитуды, т.е. моментам, когда фаза колебаний зонда равна  $90^\circ$  и  $270^\circ$ . В этом случае цифровой код на выходе АЦП будет точно соответствовать амплитуде колебаний зонда вибротермозонда.

Благодаря описанным в данной статье техническим решениям удалось создать экспериментальный образец миниатюрного вибровискозиметрического датчика с хорошими метрологическими характеристиками. Высокая точность измерения амплитуды и частоты механических колебаний измерительного зонда позволяет применять описанный вибровискозиметрический датчик в переносных компактных вибровискозиметрах. А высокая скорость получения измерительной информации делает возможным исследование динамики поведения жидкости, например, в процессе изменения ее температуры, т.е. осуществить инженерную реализацию «Динамического способа исследования теплофизических свойств жидкостей и устройства для исследования теплофизических свойств жидкостей» [6].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каплун А.Б., Соловьев А.Н. Вибрационный метод измерения вязкости жидкостей. Новосибирск : Наука, 1970. 140 с.
2. Измерения массы, плотности и вязкости. М.: Изд-во стандартов, 1988. 175с.
3. Соломин Б.А., Галкин В.Б., Паничкин Г.Н. Метод неравновесной термодинамики для исследования межмолекулярных взаимодействий в смазочных маслах. Химия и технология топлив и масел. 2008. № 5. С. 48-52.
4. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: ГИТТЛ, 1953. 796 с.
5. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидродинамика. Часть 1. М.: Физматгиз, 1963. 583с.
6. Динамический способ исследования теплофизических свойств жидкостей и устройство для исследования теплофизических свойств жидкостей: пат. 2263305 РФ. № 2004122182/28; заявл. 19.07.2004; опубл. 27.10.2005. Бюл. № 30.
7. Вибровискозиметрический датчик: пат. 2419781 РФ. № 2008137896/28; заявл. 22.09.2008; опубл. 27.05.2011. Бюл. №15.

### PITCHFORK VIBRO-VISCOSIMETRIC SENSOR FOR INVESTIGATION OF THERMALLY INDUCED PROCESSES IN LIQUIDS

© 2015 B.A. Solomin<sup>1</sup>, A.M. Nizametdinov<sup>1,2</sup>, A.A. Chertoriyskiy<sup>1</sup>, M.L. Kontorovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Branch of Institute of Radio Engineering and Electronics named after V.A. Kotel'nikov of RAS  
<sup>2</sup>Ulyanovsk State Technical University

This article describes the vibro-viscometric sensor with pitchfork oscillatory system. Considered the possibilities of its application for studying thermally induced intermolecular processes in liquids. It is shown that the optimal setting of the pitchfork allows to minimize the influence of the method of mounting the sensor on its metrological characteristics. Keywords: viscometer, pitchfork, vibration viscometric sensor, intermolecular interaction, sensitivity, thermally stimulated processes.

---

*Boris Solomin, Candidate of Technics, Leading Research Fellow. E-mail: solomin.boris@yandex.ru*

*Azat Nizametdinov, Post-Graduate Student of Ulyanovsk State Technical University. E-mail: ani-zametdinov@yandex.ru*

*Alexey Chertoriyskiy, Candidate of Technics, Deputy Director. E-mail: a-tchertor@yandex.ru.*

*Mikhail Kontorovich, Leading Engineer.*

*E-mail: kantor2@yandex.ru*