УДК 681.586.773

ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЙ МСК ДАТЧИК ВЯЗКОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЖИДКИХ СРЕД С МИКРОЗАЗОРОМ

В.Н. Седалищев, М.Ю. Ларионов, С.А. Синеев, А.А. Соснова, Д.О. Страхатов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

В статье приведено описание пьезорезонансного датчика вязкости с микрозазором, основанный на использовании связанных колебаний составных пьезорезонаторов. Датчик такого типа предназначен для исследования вязкоупругих характеристик жидких сред, характеризуется высокой чувствительностью и повышенной точностью измерения, так как имеет дифференциальный выход.

Ключевые слова: измерение вязкости, пьезорезонансный датчик с микрозазором, связанные колебания пьезорезонаторов.

Вязкость является одним из основных параметров контроля качества продукции в технологии производства жидких сред в химической, нефтехимической, фармацевтической, перерабатывающей, сельскохозяйственной, металлургической и других отраслях. Например, вискозиметры используются в фармацевтических лабораториях при изготовлении лекарственных препаратов, патоки, мазей, линиментов.

В нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей промышленности используются как ротационные, так и капиллярные вискозиметры, позволяющие с высокой точностью определять вязкие свойства нефти и продуктов ее переработки.

В химической промышленности и металлургии применяют высокотемпературные вискозиметры, позволяющие определять вязкость расплавов в широком диапазоне температур [1, 2].

Вискозиметрия используется в машиностроении, например, для определения вязкости смазочных масел, как основного показателя их качества. Для двигателя или любого другого механизма необходимо применять масла с оптимальной вязкостью, величина которой зависит от конструкции, режима работы и степени износа, температуры окружающей среды и других факторов. Вязкость смазочных масел должна соответствовать диапазону температур окружающей среды, при которых масло способно обеспечивать нормальную работу двигателя – его проворачивание стартером, прокачивание масла насосом по смазочной системе при холодном пуске и надежное смазывание летом при длительной работе в режиме максимальных скоростей и нагрузок. При эксплуатации двигателя особенно важна вязкость при большой скорости сдвига, которая показывает поведение масла в узких узлах трения двигателя - в подшипниках коленчатого и распределительного валов, кривошипно-шатунного механизма и т.д.

В медицине актуально измерение вязкости человеческой крови. Например, известно, что она увеличивается при тяжелой физической работе, а при некоторых инфекционных заболеваниях, наоборот, снижается. Определение вязкости крови во взаимосвязи с рядом других анализов позволяет объективно оценить состояние человеческого организма. Для этой цели используются капиллярные вискозиметры, метод падающего шарика, ротационные вискозиметры.

В настоящее время требуется измерять не только вязкость крови, но и другие ее физико-механические характеристики. Дело в том, что в нашей крови содержится большое количество достаточно громоздких клеток, определенным образом оказывающих влияние на кровоток. До сих пор исследователи считали, что остальная часть крови (плазма) представляет собой обычную жидкость и не оказывает влияния на этот процесс. Но недавно, группа ученых из Германии показала, что плазма обладает свойством упругости, как и твердые тела. Эта так называемая «эластичность» плазмы играет важную роль для кровотока в мельчайших сосудах. Датчики, способные измерять вязкоупругие свойства плазмы, могут пригодиться, например, для разработки искусственных заменителей, соответствующих по своим свойствам обычной крови.

Таким образом, в настоящее время является актуальной задача создания надежных, информативных, обладающих высокими метрологическими характеристиками вискозиметров, применимых для измерения так же и вязкоупругих характеристик жидкостей в широком диапазоне значений вязкости.

Для этой цели наиболее пригодны датчики, реализующие вибрационный метод измерения. Устройства такого типа основаны на измерении механического сопротивления, которое жидкая среда оказывает колеблющемуся в ней вибратору. Измерительный зонд при этом может совершать колебания с амплитудой всего в несколько микрометров. Вибраторы конструктивно выполняют в виде тела правильной геометрической формы: шара, круглого стержня, пластины, камертона и т.д. Возбуждение механических колебаний производится за счет внешней силы, создаваемой пьезоэлектрическими, электромеханическими, электромагнитными и другими преобразователями. Для этой цели возможно использование продольных, изгибных, крутильных, вращательных и других видов механических колебаний вибрационного измерительного зонда [1].

Принцип работы вискозиметров вибрационного типа основан на классической теории вязкого сопротивления, возникающего в слоях жидкости при проскальзывании их относительно друг друга с определенным коэффициентом вязкости. Если зонд совершает механические колебания в жидкости, то в тонком пограничном слое раздела зонд – жидкость образуется поперечная сдвиговая волна. Особенность этой волны – ее быстрое затухание при движении вглубь жидкости. Глубина проникновения поперечной сдвиговой волны может составлять от долей сантиметра до нескольких микрометров [1].

При размерах вибрационного измерительного зонда значительно меньших длины волны, создаваемой зондом, составляющей сопротивления излучения можно пренебречь и учитывать только активное и реактивное сопротивления вязкого трения, формируемого в тонком пограничном слое. Составляющие активного сопротивление обусловлены вязким трением слоев жидкости. Реактивные составляющие комплексного механического сопротивления вибратора определяется двумя факторами.

Первая составляющая обусловлена тем, что зонд перемещает с собой некоторый объем вязкой жидкости, называемой присоединенной массой. Данная составляющая сопротивления пропорциональна частоте колебаний зонда и величине присоединенной массы не зависит от вязкости среды.

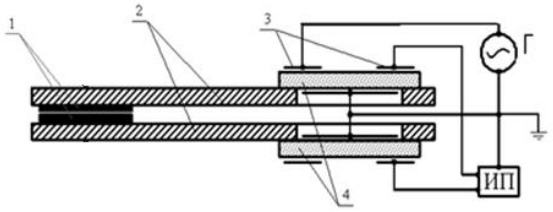
Вторая составляющая обусловлена наличием упругих деформаций в жидкости и так же зависит от частоты колебаний вибратора. При измерении вязкости жидких сред на высоких частотах (10÷100 кГц) демпфирующие свойства многих жидкостей значительно уменьшаются из-за действия сдвиговой упругости жидкости. При сдвиге слоев среды относительно друг друга на небольшое расстояние возникает упругая деформация жидкости. Если величина времени периода колебаний зонда соответствует постоянной времени релаксации молекул жидкости, то упругое сцепление не успевает разрушиться и «проскальзывание» слоев становится частичным, т. е. жидкость частично приобретает свойства «твердого» тела. В результате этого в области, прилегающей к поверхности вибратора, образуется тонкий вязкоупругий слой жидкости. При этом наличие сдвиговой упругость жидкости обусловит расхождение показаний вязкости, измеренных вибрационным и, например, ротационным вискозиметрами.

Сравнивая полученные значения вязкости, можно определять упругие характеристики жидкости, но такой способ является дорогостоящим и трудоемким.

В связи с этим представляет интерес исследование возможности разработки для этой цели датчика вязкости вибрационного типа, позволяющего при возбуждении низкой частоты колебаний вибратора измерять в основном сдвиговую составляющую вязкости, а в режиме высоких частот – упругие характеристики жидкости.

Для исследования вязкоупругих характеристик жидких сред можно использовать, например, конструкцию высокочастотного датчика вязкости с микрозазором между пьезорезонаторами.

Прототип такой конструкции датчика был использован для измерения вязкоупругих характеристик жидкостей. Конструктивно он состоял из пьезорезонатора и неподвижной поверхности, между которыми находился тонкий слой исследуемой жидкости [3]. Применение такого устройства позволило, например, установить наличие аномалий вязкоупругих характеристик воды в области в сравнительно низких частот (десятки кГц).



Условные обозначения:
Г – генератор, ИП – измерительный прибор, 1 – контактирующие поверхности, 2 – звукопроводы, 3 – обкладки пьезорезотрансформаторов, 4 – пьезоэлементы

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

На рисунке 1 представлена конструкция ПР МСК датчика вязкости с микрозазором, основанного на модуляции в функции вязкоупругих характеристик жидкости параметров связанных колебаний пьезорезонаторов. Конструкции датчиков такого типа использовались авторами для измерения самых разнообразных физических величин [4-8].

Устройство состоит из двух взаимодействующих между собой составных пьезорезонаторов, в месте контакта между пьезорезонаторами находится тонкий слой исследуемой жидкости. АЧХ датчика имеет две резонансные частоты, обусловленные синфазными и противофазными колебаниями пьезорезонаторов (Рисунок 2).

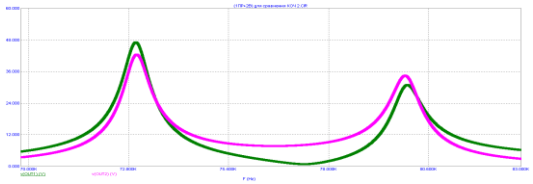


Рисунок 2 – Амплитудно-частотная характеристика ПР МСК датчика вязкоупругих характеристик жидких сред

В качестве выходных параметров такого датчика могут использоваться отношения выходных напряжений, снимаемых с дополнительных обкладок пьезоэлементов на частотах их синфазных и противофазных колебаний, разность или отношение нормальных частот связанных колебаний пьезорезонаторов. Данные параметры функционально связаны с вязкоупругими характеристиками жидкостного элемента связи между взаимодействующими пьезорезонаторами. Измеряя, например, отношение амплитуд связанных колебаний пьезорезонаторов можно определять значения коэффициентов упругой связи на нормальных частотах синфазных и противофазных колебаний в системе. Для этого можно воспользоваться известным из теории колебаний соотношением [4]:

$$\frac{\grave{A}}{\hat{A}} = \frac{1 \pm \sqrt{1+\sigma^2}}{\sigma},$$

$$\sigma \approx \frac{\gamma}{\xi}.$$

где σ – коэффициент связанности;

γ – коэффициент связи;

ξ – относительная расстройка парциальных частот пьезорезонаторов;

A и B - амплитуды колебаний пьезорезонаторов.

На частоте синфазных колебаний пьезорезонаторов приближенно можно считать [6, 7]:

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_1 \approx \frac{\sigma_1}{2} \approx \frac{\gamma_1}{2 \cdot \xi},$$

$$\gamma_1 \approx 2 \cdot \xi \cdot \left(\frac{U_2}{U_1}\right),$$

$$\gamma_1 \approx \frac{\tilde{N}_0}{\tilde{N}_1}.$$

где U – выходные напряжения пьезоэлектрического трансформатора (ПЭТ),

$\tilde{N}_0$ и $\tilde{N}_1$ – соответственно, эквивалентные емкости пьезорезонаторов и элемента упругой связи между ними на частоте синфазных колебаний.

Аналогично, для нормальной частоты противофазных колебаний пьезорезонаторов можно получить следующие соотношения:

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)_2 \approx \frac{\sigma_2}{1-\sigma_2} \approx \frac{\gamma_2}{\xi-\gamma_2},$$

$$\gamma_2 \approx \frac{\xi \cdot \left(U_2 \diagup U_1\right)_2}{1-\left(U_2 \diagup U_1\right)_2},$$

$$\gamma_2 \approx \frac{\tilde{N}_0}{\tilde{N}_2}.$$

Важно отметить, что при преобладании упругой связи в колебательной системе датчика нормальная частота противофазных колебаний пьезорезонаторов больше частоты их синфазных колебаний, а при преобладании инерционной связи, наоборот, меньше нормальной частоты синфазных колебаний. При чисто резистивной связи между пьезорезонаторами, обусловленной вязкостью жидкости, нормальная частота синхронизации противофазных колебаний в системе отсут-

ствует. Причиной преобладания того или другого вида связи в системе может являться проявление в большей степени соответствующих факторов: увлечения определенной массы жидкости поверхностью вибраторов; вязкостью или упругостью жидкости.

Таким образом, измеряя амплитудные, частотные и фазовые выходные характеристики связанных колебаний пьезорезонаторов в датчике данной конструкции можно определять плотность, вязкость и упругие характеристики жидких сред.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колешко, В. М, Сунка В.Я., Полынкова Е.В., Крупская Е.В. Проектирование интеллектуальных сенсорных систем измерения вязкости материалов / Учебно-методическое пособие по дисциплине “Сенсоры и сенсорные системы” – Минск: БНТУ, 2010.

2. Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с.

3. Бадмаев Б.Б. Низкочастотная сдвиговая упругость жидкостей / Б.Б. Бадмаев, С.А. Бальжинов, Б.Б. Дамдинов, Т.С. Дембелова // Акустический журнал. 2010. Т. 56, №5. С. 602-605.

4. Седалищев, В.Н. Высокочувствительные пьезорезонансные датчики с использованием связанных колебаний для экстремальных условий эксплуатации / В.Н. Седалищев, О.И. Хомутов – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. -184 с.; 55 см. – Библиогр.; с. 180 – 184. – 100 экз. - ISBN 5-7568-0669-5

5. Седалищев, В.Н. Пьезорезонансные датчики на связанных колебаниях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2005. - №11. - С. 41 - 42.

6. Седалищев, В.Н. Измерительные устройства, основанные на реализации режимов связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Ползуновский вестник. - 2006. - № 2. – С. 264 – 269.

7. Седалищев, В.Н. Особенности конструирования пьезолектрических измерительных устройств на связанных колебаниях // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2006. - № 4. - С. 44-46.

8. Седалищев, В.Н. Использование связанных колебаний в пьезорезонансных датчиковых структурах // Измерительная техника. - 2006. - № 3. - С. 59-61.

Седалищев Виктор Николаевич – д.т.н., профессор, тел.:(3852) 260492, e-mail:Sedalischew@mail.ru; Новичихин Андрей Викторович-аспирант; Крючков Евгений Михайлович – аспирант; Ларионов Максим Юрьевич – аспирант; Синеев Семен Алексеевич - аспирант; Соснова Анастасия Александровна – магистрант, Д.О. Страхатов – студент.