

УДК 681. 2. 08

Т.Ю. Кисиль, аспирант

Черкасский государственный технологический университет

E-mail: cheti@cheti.cherkassy.ua

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ С ПОМОЩЬЮ АСИММЕТРИЧНЫХ БИМОРФНЫХ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ

Рассматривается метод измерения вязкости вещества с помощью пьезоэлектрических преобразователей путем возбуждения в них свободных колебаний и оценки вязкости по числу этих колебаний.

Вязкость – свойство жидкостей оказывать сопротивление необратимому перемещению одной их части относительно другой при сдвиге, растяжении и других видах деформации. Вязкость можно рассматривать как проявление внутреннего трения жидкостей при их движении, которое, в свою очередь, является результатом огромных сил сцепления, существующим между молекулами жидкости. В том случае, когда прилегающие друг к другу слои жидкости движутся с различными скоростями, между ними возникает некоторая сила F , стремящаяся выровнять эти скорости. На более быстро движущийся слой эта сила действует замедляюще, а на медленнее движущийся слой – ускоряюще. Очевидно, что в простейшем случае сила прямо пропорциональна поверхности соприкосновения S и перепаду скорости dv/dx , следовательно

$$F = \eta \frac{dv}{dx} S,$$

где η – вязкость или коэффициент внутреннего трения, характерный для каждой жидкости.

Методы измерения вязкости жидкостей разделяются на три группы.

1. Методы, основанные на измерениях касательного напряжения P , поддерживающего в условиях однородного сдвига заданную постоянную скорость деформации (градиент скорости $G = \frac{dv}{dL} = \frac{d\varepsilon}{dt}$, где v – скорость сдвига; ε – относительный сдвиг; t – время; L – расстояние между двумя бесконечно тонкими слоями). Вязкость η вычисляется из определения этой величины по Ньютону как $\eta = P/G$. При этом может задаваться как скорость сдвига G (например, от мотора с редуктором) и измеряться соответствующее касательное напряжение P , так и наоборот, задаваться P (например, грузом) и измеряться устанавливающаяся скорость сдвига G . Основным требованием вязкости является независимость η от $G(P)$, соответствующая условию ламинарности течения.

2. Методы, основанные на измерении средних скоростей

установившегося течения в потоке заданной формы (например, в капилляре) или скорости установившегося движения (падения) твердого тела определенной формы в безграничной вязкой среде. Эти методы наиболее точны и широко распространены.

3. Методы, основанные на измерении скоростей неустановившихся движений: наблюдение за затуханием амплитуды периодических колебаний или уменьшением скорости в аperiodическом движении, происходящими вследствие перехода кинетической энергии в тепло в результате внутреннего трения исследуемой среды.

В методах 2-й и 3-й групп распределение скоростей в потоке нелинейно, т.е. соответствует неоднородному сдвигу, а в методах 3-й группы, кроме того, и нестационарному потоку.

Измерения вязкости могут быть абсолютными или относительными. Классическими абсолютными методами являются метод капилляров, метод вращающихся цилиндров, метод падающего шарика. В сложных случаях, когда распределение скоростей или закон движения, например, твердого тела в вязкой среде, не могут быть получены аналитически из общих законов гидродинамики вязкой среды, абсолютные измерения вязкости становятся невозможными. В этих случаях, исходя из теории подобия вязких потоков, можно получать относительные значения вязкости с достаточной точностью, если градуировать прибор с известными значениями вязкости (глицерино-водные или глицерино-сахарные растворы). Однако и в последнем случае вискозиметры должны удовлетворять основным требованиям вязкости.

К 1-й группе относятся 2 вида приборов:

- менее совершенные, в которых наибольшая величина деформации ограничена размерами прибора;

- более совершенные методы с неограниченной величиной деформации, позволяющие наблюдать за длительным установлением стационарной скорости сдвига, иногда лишь после того, как достигнута весьма большая деформация сдвига $\varepsilon \gg 1$, например, в случае высоковязких и эластичных (структурированных) жидкостей (полимеров и их концентрированных растворов – студней); таковы приборы, основанные на относительном вращении коаксиальных цилиндров радиусами r_1 и r_2 , зазор между которыми $\Delta r = (r_2 - r_1) \ll r_1$ заполнен данной вязкой средой.

Приборы 2-й группы, характеризующиеся неоднородностью поля скоростей сдвига (при условии обеспечения стационарного течения), весьма многообразны. К ним относятся:

- вискозиметры ротационного типа, имеющие в отличие от приборов 1-й группы зазоры произвольной ширины; в случае истинно вязких (ньютоновых) жидкостей дифференциальное уравнение для η может быть проинтегрирова-

но для этого случая и потому распределение скоростей известно;

- вискозиметры, основанные на течении вязкой среды в достаточно длинных и узких трубках (капиллярах) постоянного круглого сечения; последние обычно используются для точных измерений вязкости ньютоновских жидкостей;

- вискозиметры, основанные на измерении скорости установившегося движения твердого шарика в данной вязкой среде под действием постоянной внешней силы, в простейшем случае – силы тяжести.

Приборы 3-й группы имеют значительно более сложную теорию или вообще не могут служить для абсолютных измерений вязкости. Поэтому их нельзя рекомендовать, за исключением особых случаев, когда не могут быть применены вискозиметры 1-й и 2-й групп.

Авторами предложен вариант ультразвукового метода измерения вязкости жидкости с помощью пьезоэлектрических преобразователей, помещенных в исследуемую жидкость, и измерения вязкости путем возбуждения в них свободных колебаний, а также определении вязкости по числу этих колебаний, превышающих фиксированный уровень.

При импульсном возбуждении пьезопреобразователя в нем возникают колебания с собственной частотой, затухающие по экспоненциальному закону с показателем затухания δ :

$$\delta = \frac{R}{2L}.$$

Затухание этих колебаний зависит как от потерь в самом пьезоэлементе R_1 , так и от вязкого трения (вязкости) жидкости R_2 и от величины ультразвуковых (УЗ) потерь R_3 , которые зависят от глубины погружения преобразователя в жидкость. При неизменной величине внутреннего трения пьезокерамики (R_1) и УЗ потерь R_3 , затухание колебаний зависит только от вязкости R_2 жидкости.

Декремент затухания Δ равен

$$\Delta = e^{-\delta T} = e^{-\frac{R}{2Lf_p}},$$

где $R=R_1+R_2+R_3$; f_p - частота следования импульсов:

$$f_p = \frac{1}{T};$$

L - эквивалентная индуктивность пьезоэлемента.

Число свободных колебаний N_0 от начальной амплитуды A до амплитуды a можно определить из выражения:

$$e^{-\frac{RN_0}{2Lf_p}} = \frac{a}{A}.$$

После простейших преобразований получим:

$$N_0 = \frac{2Lf_p}{R} \ln \frac{1}{a}.$$

Число колебаний за секунду находится из выражения

$$N = f_{cl} f_{рез} \frac{2L}{R_2 + R + R_3} \ln \frac{1}{a},$$

где f_{cl} - частота следования импульсов; $f_{рез}$ - резонансная частота пьезоэлемента; L - эквивалентная индуктивность.

Отсюда следует, что по числу колебаний N можно судить о вязкости жидкости. Наличие УЗ потерь и их зависимость от глубины погру-

жения является недостатком описанного метода. Для устранения указанного недостатка авторами предложено в качестве вибратора использовать асимметричный биморфный элемент, состоящий из металлической пластины и пьезоэлемента. Полезно отме-

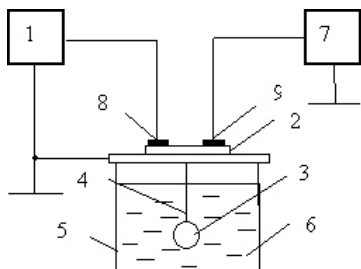


Рисунок 1 – Устройство для измерения вязкости жидкости

тить, что чувствительность асимметричного биморфного элемента, работающего на изгиб, на один-два порядка выше, чем чувствительность

одиночного пьезоэлемента, работающего в тех же условиях.

Биморфный элемент состоит из металлической пластинки диаметром 32, толщиной 0,2 мм из стали 40Х и пьезоэлемента диаметром 24, толщиной 0,2 мм из пьезокерамики ЦТС-19. В центре биморфного элемента закреплена тяга диаметром 0,6 и длиной 15 мм. К тяге припаян стальной шарик диаметром 3 мм.

Это устройство, изображенное на рисунке 1, состоит из генератора электрических колебаний 1, вибратора 2, выполненного в виде асимметричного биморфного элемента, рабочего инструмента 3 в виде шара, жесткой тяги 4, сосуда 5 с жидкостью 6 и счетчика 7. На биморфном элементе 2 выполнены входная 8 и выходная 9 системы электродов, подключенных соответственно к генератору 1 и счетчику 7.

Разработанный вискозиметр, принцип действия которого основан на

использовании ультразвукового метода, позволяет существенно повысить точность измерения вязкости жидкости.

Поступила в редакцию 23.12.2002 г.