

## РОТАЦИОННЫЙ ВИСКОЗИМЕТР

**О.Г. Корганова, В.А. Кузнецов**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 244

*Рассматривается ротационный вискозиметр, его конструктивное выполнение, особенности работы. Оцениваются погрешности измерения вязкости.*

**Ключевые слова:** вязкость, ротационный вискозиметр, погрешность.

На кафедре ИИТ разработан ротационный вискозиметр для определения вязкости в интервале 20-1000 Пуаз (2-100 Па·с).

Принцип работы ротационного вискозиметра основан на зависимости вращающего момента, приложенного к ротору, погруженному в исследуемую массу, от вязкости этой массы.

Крутящий момент, приложенный к ротору, определяется соотношением

$$M_k = Fr, \quad (1)$$

где  $M_k$  – крутящий момент на роторе;  $F$  – сила, приложенная к ротору;  $r$  – радиус ротора.

Сила, приложенная к ротору, определяется законом Ньютона

$$F = \eta \frac{(\omega S)}{l}, \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения ротора;  $S$  – рабочая площадь ротора;  $l$  – зазор между стаканом и ротором;  $\eta$  – вязкость.

Подставляя соотношение (2) в формулу (1), получим

$$M_k = \eta \frac{(\omega Sr)}{l}. \quad (3)$$

Если угловая скорость вращения ротора  $\omega$  и размеры роторного блока постоянны, то крутящий момент  $M_k$  пропорционален вязкости  $\eta$ .

Таким образом, зная значение крутящего момента на роторе, можно определить динамическую вязкость исследуемой массы.

Для определения крутящего момента на роторе нужно создать противодействующий момент на чувствительном элементе – пружинном торсионе.

Основные узлы прибора и внешний вид представлены на рис. 1: 1 – основание, 2 – трансформатор, 3 – стойка, 4 – кронштейн термометра, 5 – кронштейн измерительной головки, 6 – измерительная головка, 7 – карданный подвес, 8 – ротор, 9 – измерительный стакан, 10 – термометр. В измерительной головке расположены синхронный электродвигатель 11, фотоэлектрический преобразователь крутящего момента 12 и плата, на которой размещен блок питания и схема измерения вязкости и температуры 13.

Измерение вязкости и температуры ведется по двум каналам, затем данные по-

---

*Ольга Георгиевна Корганова (к.т.н., доц.), доцент каф. информационно-измерительной техники.*

*Владимир Андреевич Кузнецов (к.т.н., доц.), доцент каф. информационно-измерительной техники.*

ступают в микроконтроллер и обрабатываются программным образом (рис. 2).

Электродвигатель должен обеспечивать вращение с постоянной скоростью. Далее скорость вращения электродвигателя подвергается редуцированию в редукторе, что необходимо для увеличения мощности на валу электродвигателя. Вал электродвигателя и вал ротора соединены пружинным торсионом.

Под действием вязкостного сопротивления исследуемой массы на роторе создается крутящий момент, посредством которого происходит скручивание пружинного торсиона ПТ.

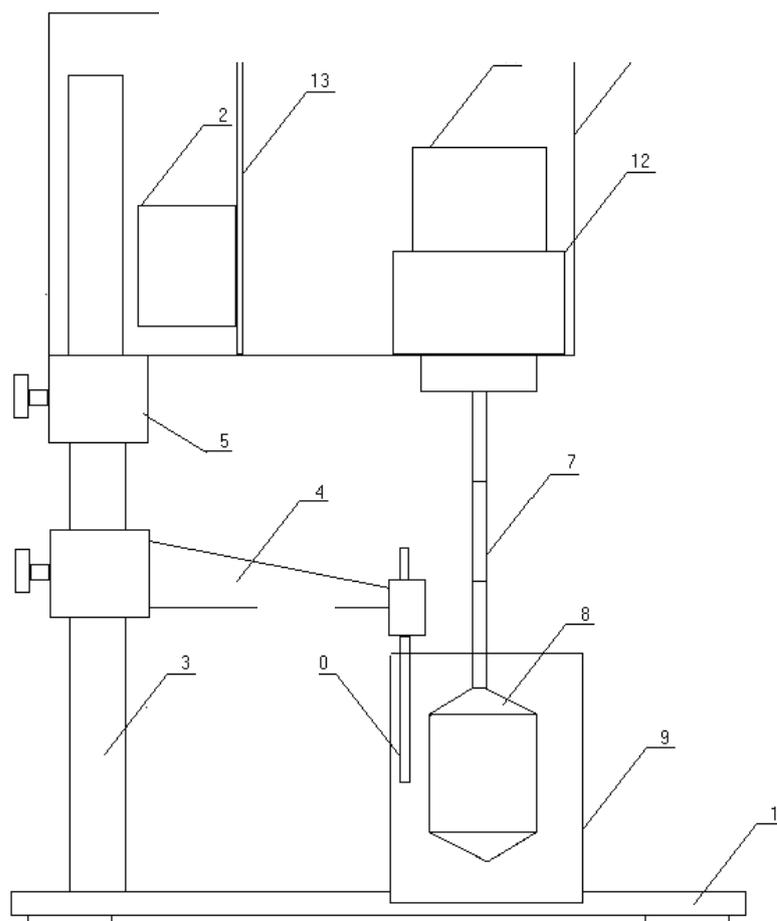


Рис. 1. Основные узлы вискозиметра

Измерение вязкости исследуемой массы происходит за счет определения угла закручивания пружинного торсиона (рис. 2): 1 – двигатель; 2 – измерительный ротор; 3 – пружинный торсион; 4, 5 – измерительные диски; 6, 7 – оптопары; 8, 10 – преобразователи импульсов; 9 – формирователь «временных ворот»; 11 – испытуемая жидкость; 12 – измерительный стакан. Для определения угла закручивания пружинного торсиона на его концах находятся датчики угла поворота – диски с прорезями.

Дисковые насадки, посредством которых осуществляется преобразование крутящего момента во временной интервал, имеют по восемь прорезей с сектором между соседними прорезями, равным  $45^\circ$ .

В качестве торсиона используется пружина, которая при максимальном крутящем моменте обеспечит закручивание на угол не более  $2/3$  сектора между соседними прорезями диска, то есть на угол не более  $30^{\circ}$ . При приложении к пружине момента сопротивления ее витки закручиваются, в результате чего в пружине создается противомомент.

Количество импульсов при одном повороте дисковой насадки равно восьми. Для определения вязкости жидкости нужно сделать не меньше четырех оборотов диска. Затем данные усредняются и выдается средний результат измерений.

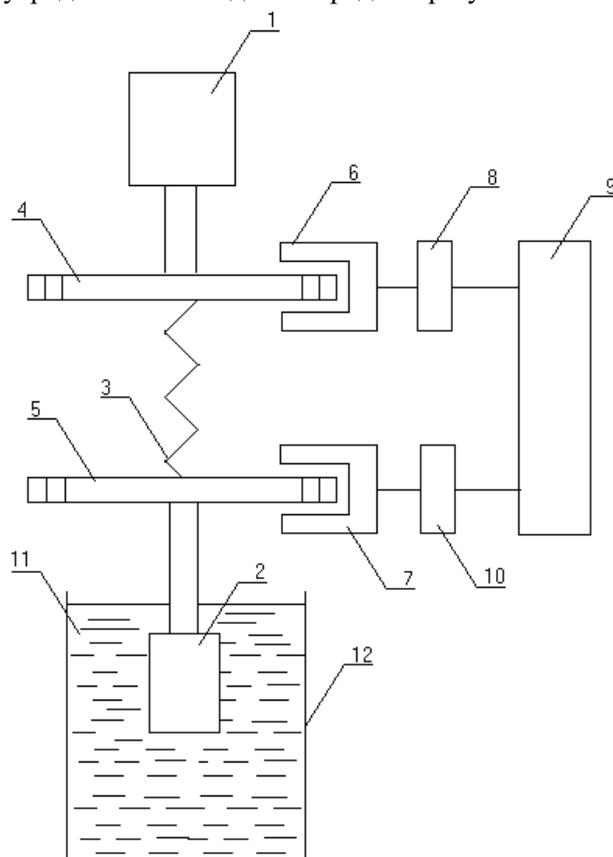


Рис. 2. Функциональная схема ротационного вискозиметра с пружинным торсионом

Далее с помощью фотопреобразователя происходит преобразование крутящего момента во временной интервал. Это происходит следующим образом.

Прорези на дисках включают и выключают оптопары – формирователи начала отсчета ОП1 и сброса ОП2 (старт-импульс и стоп-импульс). Эти импульсы, пройдя соответственно через триггеры Шмитта ТШ1 и ТШ2, преобразовывают сигнал криволинейной формы, неудобный для работы в дальнейшем, в прямоугольный интервал (рис. 3). С помощью формирователей Ф1 и Ф2 также осуществляют дифференцирование прямоугольных импульсов по заднему фронту. Далее сигналы поступают на RS-триггер, который формирует так называемые «временные ворота» в зависимости от сочетания уровня сигналов (высокого, низкого) на его входах. Временные ворота как раз и есть разность во вращении измерительных дисков, пропорциональная вязкости. Нужно учесть, что запрещенным состоянием для RS-триггера

является подача одинаковых сигналов высокого уровня на входы R и S. Для того чтобы этого избежать, измерительные диски преднамеренно в начальных условиях вращаются асинхронно, эту разность вращения нужно учесть при подсчете вязкости, она составляет  $\approx 0,04$ с. Точное установление вязкости можно определить уже после 4 оборотов дисков.

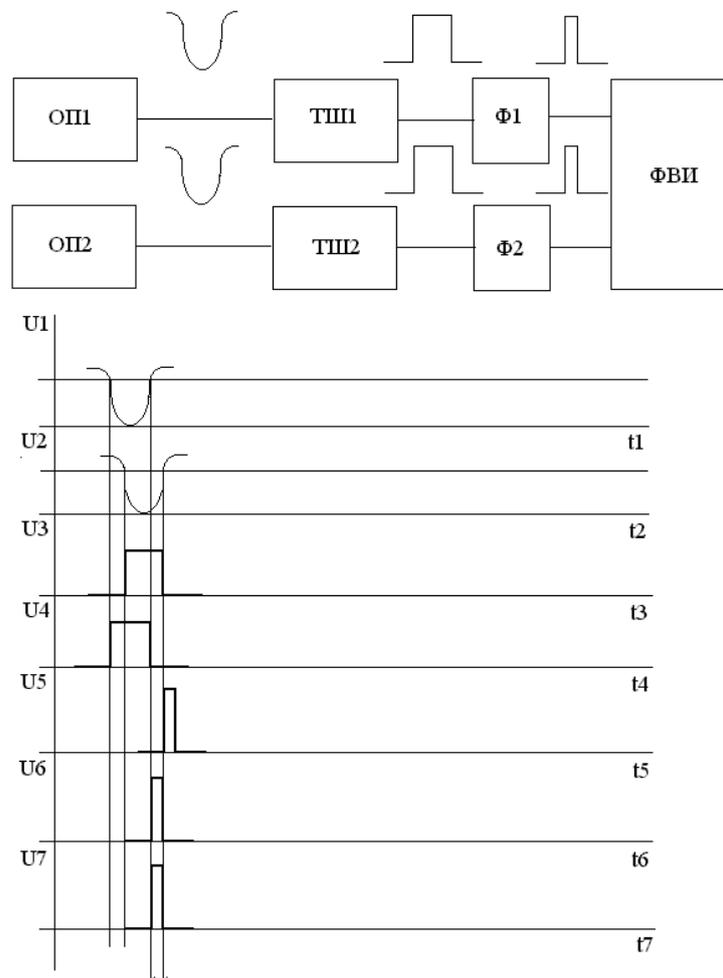


Рис. 3. Преобразование сигналов при измерении вязкости

Канал измерения температуры состоит из терморезистора, сопротивление которого меняется с изменением температуры преобразователя сопротивления в напряжение, преобразователя напряжения в частоту (ПНЧ). Поскольку вязкость зависит от температуры исследуемой массы, то необходимо осуществлять измерение температуры.

Температура исследуемого вещества измеряется термометром сопротивления 10 (ТСМ градуировки 50М), погружаемым в исследуемое вещество посредством поворота кронштейна 4. Электрическое сопротивление термометра 10 (рис. 1), линейно зависящее от температуры в диапазоне от 0 до 100 °С, преобразуется в частоту [3].

Резистивный термометр (терморезистор) выполнен из медной проволоки. Ее сопротивление увеличивается при увеличении температуры. Через терморезистор

протекает стабилизированный ток. Под действием температуры терморезистор меняет свое сопротивление.

Электрическое сопротивление терморезистора с помощью операционного усилителя преобразуется в напряжение.

Следующий узел схемы измерения температуры состоит из интегратора, который интегрирует входное напряжение по времени:

$$U_Y = -\frac{1}{RC} \int_0^{t_1} U_X dt + U_{C0},$$

где  $U_Y$  – выходное напряжение усилителя;  $U_X$  – входное напряжение интегратора;  $t_1$  – время интегрирования;  $U_{C0}$  – напряжение конденсатора в начальный момент времени.

Интегрирование производится на начальном участке заряда емкости  $C$ , который является достаточно линейным [4], поэтому погрешностью интегратора можно пренебречь.

Для анализа погрешностей вискозиметра необходимо обратиться к выражению (3).

Крутящий момент торсионной пружины преобразуется в угол закручивания

$$\alpha = K_1 M_k,$$

где  $K_1$  – коэффициент жесткости пружины.

С помощью фотопреобразователя угол закручивания преобразуется во временной интервал:

$$\tau = K_2 \alpha,$$

где  $K_2$  – коэффициент преобразования фотопреобразователя.

Временной интервал заполняется импульсами стабильной частоты  $f_0$ , формируемой высокостабильным генератором.

Таким образом, цифровой код, формируемый на выходе счетчика импульсов, определяется выражением

$$N = f_0 \tau = f_0 K_2 \alpha = f_0 K_1 K_2 M_k = f_0 K_1 K_2 \frac{\omega s r}{l} \eta.$$

Функция преобразования всего устройства имеет вид

$$N = K \eta,$$

где  $K = f_0 K_1 K_2 \frac{\omega s r}{l}$ .

Точность измерения зависит от стабильности коэффициента  $K$ :

$$K = f_0 K_1 K_2 \frac{2\pi n 2\pi r h r}{r_c - r} = f_0 K_1 K_2 \frac{4\pi^2 r^2 n h}{r_c - r}.$$

Здесь  $r$  – радиус измерительного ротора,  $r_c$  – радиус измерительного стакана,  $n$  – частота вращения ротора,  $h$  – высота боковой поверхности измерительного ротора.

Таким образом, относительная погрешность измерения вязкости определяется выражением

$$\delta_\eta = \sqrt{\delta_r^2 + \delta_{rc}^2 + \delta_h^2 + \delta_{f_0}^2 + \delta_{kt}^2 + \delta_{kn}^2 + \delta_n^2}.$$

Геометрические размеры определяются точностью изготовления детали и по технологии изготовления

$$\delta_r = \delta_{rc} = \delta_h = 0,02\%$$

частота кварцевого генератора задается с погрешностью  $\delta f_0 = 0,001\%$ .

Погрешность преобразования фотопреобразователя носит случайный характер. Для ее уменьшения применяется усреднение сигнала за четыре оборота измерительного ротора, чем достигается погрешность порядка  $\delta_{kf} = 0,10\%$ .

Стабильность торсионной пружины характеризуется погрешностью

$$\delta_{kn} = 0,1\% .$$

Частота вращения синхронного двигателя зависит от точности поддержания частоты напряжения в сети:

$$\delta_n = 0,5\% .$$

Суммируя погрешность измерения вязкости, получаем

$$\delta_\eta = 0,51\% .$$

Так как в вискозиметре предусмотрен цифровой способ представления результатов измерения вязкости, то необходимо учесть методическую погрешность от дискретности, которая является аддитивной погрешностью интервалов квантования.

Разряд цифрового индикатора:

$$q=0,1 \text{ пуаз.}$$

Максимальный диапазон измерения  $\eta_{\max} = 1000$  пуаз, следовательно, приведенная погрешность от дискретности  $\delta_d = 0,01\%$ , что хорошо согласуется с результатами экспериментов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Крутоголов В.Д., Кулаков М.В. Ротационные вискозиметры. – М.: Машиностроение, 1984. – 112 с.
2. Фазане Н.Г., Илинов Л.В., Азим-Заде А.Ю. Технологические измерения и приборы. – М.: Высшая школа, 1989. – С. 152.
3. Левшина Е.С., Новицкий П.В. Электрические измерения физических величин (измерительные преобразователи): Учеб. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, 1983. – 320 с.
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат, 1988. – 304 с.

*Статья поступила в редакцию 14 июня 2011 г.*

## ROTARY VISCOMETER

***O.G. Korganova, V.A. Kuznetsov***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

*The rotational viscometer, its design and functions are considered. Viscosity measurement errors are estimated.*

**Keywords:** *viscosity, rotary viscometer, error.*

---

*Olga G. Korganova (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.  
Vladimir A. Kuznetsov (Ph.D. (Techn.)), Associate professor.*