

$$\begin{aligned}
& \times \left[\frac{\left(-2 + \frac{3h^*}{mR} + 2\varepsilon^2\right) \sqrt{\varepsilon^2 - \left(\frac{3h^*}{4mR}\right)^2 + \frac{3h^*}{2mR} - 1 \cdot 4mR}}{3h^* \varepsilon} - \right. \\
& \left. \frac{2mR \left(-2 + \frac{3h^*}{mR} + 2\varepsilon^2\right) \sqrt{\varepsilon^2 - \left(\frac{3h^*}{2mR}\right)^2 + \frac{3h^*}{mR} - 1}}{3h^* \varepsilon} - \right. \\
& \left. \frac{2 \left[\varepsilon^2 + 3\varepsilon + \frac{2}{\varepsilon} \left(\frac{h^*}{mR} - 1 \right) \right]}{\sqrt{1 - \varepsilon^2}} \left(\operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(4mR\varepsilon - 3h^* + 4mR)(1 - \varepsilon^2)}{(4mR\varepsilon + 3h^* - 4mR)(1 + \varepsilon)^2}} - \right. \right. \\
& \left. \left. - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{(2mR\varepsilon - 3h^* + 2mR)(1 - \varepsilon^2)}{(2mR\varepsilon + 3h^* - 2mR)(1 + \varepsilon)^2}} \right) \right] + \frac{4}{9h^{*2}} \arccos \left[\frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{3h^*}{2mR} - 1 \right) \right] = \\
& = \frac{8}{9} \cdot \frac{1}{(2mR - h^*)^2 - 4(mR\varepsilon)^2} \left\{ \frac{\sqrt{\varepsilon^2 - \left(\frac{3h^*}{4mR}\right)^2 + \frac{3h^*}{2mR} - 1 \cdot 2mR}}{5h^*} - \right. \\
& \left. - \frac{2 - \frac{h^*}{mR}}{\sqrt{\left(2 - \frac{h^*}{mR}\right)^2 - 4\varepsilon^2}} \left[\operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{4mR\varepsilon - 3h^* + 4mR}{4mR\varepsilon + 3h^* - 4mR}} \times \right. \right. \right. \\
& \left. \left. \left. \times \frac{2 - \frac{h^*}{mR} - 2\varepsilon}{\sqrt{\left(2 - \frac{h^*}{mR}\right)^2 - 4\varepsilon^2}} - \frac{\pi}{2} \right) \right] \right\}. \quad (25)
\end{aligned}$$

Решение данного уравнения на ЭЦВМ дает зависимость h^* (или φ^*) от ε при заданных значениях зазора mR .

ЛИТЕРАТУРА

1. Трусов С. А., Тябин Н. В. Реодинамическая теория плоского подшипника с упруго-вязкопластической смазкой. Сб. «Пластичные смазки», Киев, «Наукова думка», 1971.
2. Зоммерфельд А. К гидродинамической теории смазки, М.—Л., ГТТИ, 1934.

Б. П. ДЬЯЧЕНКО, Г. Д. ЕВСТАФЬЕВ,
В. Н. ЕРФИЛОВ, А. П. СТАРОСТИНА

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ВЯЗКОУПРУГИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

Для исследований вязкоупругих свойств жидкостей при высоких давлениях сконструированы и изготовлены датчик (рис. 1) и комплекс испытательной аппаратуры (рис. 2), включающий

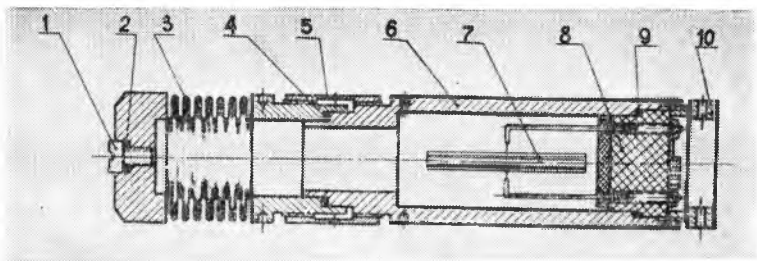


Рис. 1. Датчик для измерения вязкоупругих свойств жидкостей при высоких давлениях:

1 — пробка заливная; 2, 4, 9 — прокладки; 3 — разделитель сильфонный; 5 — гайка стяжная; 6 — корпус датчика; 7 — резонатор кварцевый; 8 — изолятор; 10 — гайка

схему высокого давления (рис. 3), систему термостатирования измерительной камеры высокого давления и электронный вибрационный вискозиметр.

Датчик состоит из резонатора, корпуса разделителя исследуемой жидкости от рабочей, передающей давление, и электропровода высокого давления. Электропровод не показан на рис. 1. Для передачи давления исследуемой среде рабочей жидкостью применен сильфонный разделитель. Зазор между поверхностью резонатора и ограничивающей стенкой корпуса разделителя равен 15 мм. При этом всегда выполняются условия неограниченности объема во всем возможном для этого метода диапазоне измерений вязкоупругих свойств жидкостей. Уплотнение электропроводов выполнено по принципу обращенного конуса. Поверхности конусов изолировались от корпуса электропровода электротехническим эпоксидным компаундом ЭКМ-4.

Датчик помещается в термостатируемую измерительную камеру системы высокого давления, рассчитанную на рабочее давление до 10000 кгс/см^2 .

Конструктивно камера высокого давления выполнена в виде двух скрепленных цилиндров, помещенных в жидкостный термостат, с помощью которого цилиндр высокого давления может быть нагрет до 200°C .

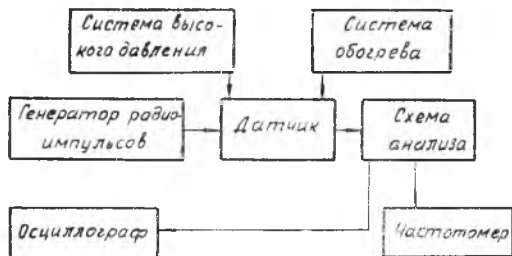


Рис. 2. Блок-схема установки для исследования вязкоупругости жидкостей при высоких давлениях

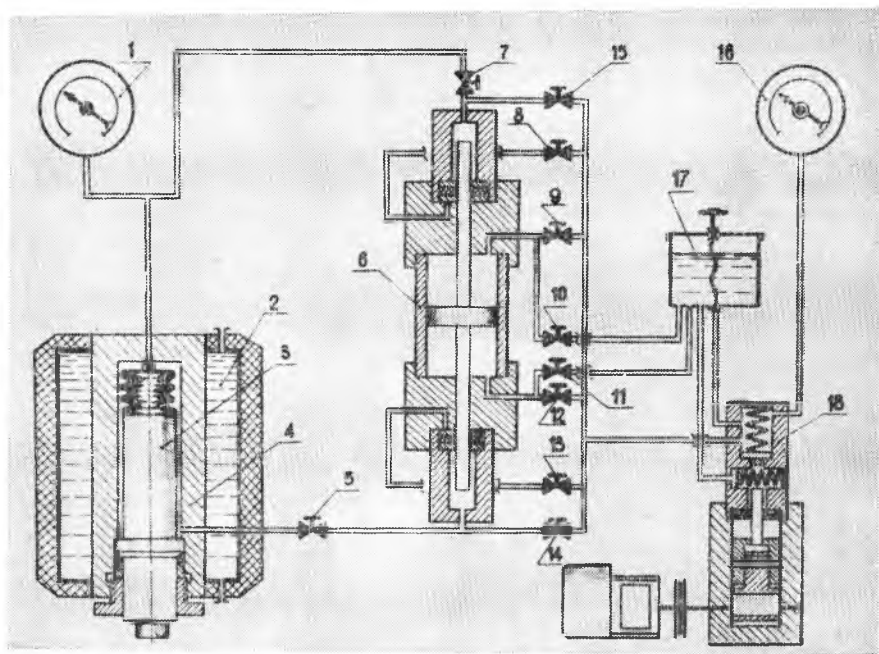


Рис. 3. Схема системы высокого давления:

1 — манометр контроля высокого давления; 2 — теплоноситель; 3 — датчик; 4 — измерительная камера высокого давления с термостатом; 5, 7, 14, 15 — вентили высокого давления; 6 — мультипликатор гидравлический; 8, 13 — вентили управления предварительной опрессовкой уплотнений мультипликатора; 9, 10, 11, 12 — вентили управления цилиндром низкого давления мультипликатора; 16 — манометр контроля давления насоса; 17 — дроссель; 18 — насос высокого давления

Давление в камере развивается с помощью насоса высокого давления и гидравлического мультипликатора при соответствующем управлении вентилями высокого давления (см. рис. 3).

Электронный вибрационный вискозиметр состоит из генератора радиоимпульсного возбуждения, датчика и устройства анализа параметров экспоненциально затухающих колебаний. Сформированный генератором радиоимпульс имеет частоту формирующих его синусоидальных колебаний, укладывающуюся внутри полосы пропускания резонатора. Генератор формирует импульсы, начало и конец которых максимально приближены к моменту перехода через нулевые значения формирующих их синусоидальных колебаний.

Радиоимпульсы через электроввод высокого давления подаются к резонатору, возбуждая в нем крутильные колебания. В момент паузы после действия радиоимпульса кварцевый резонатор, совершая свободные колебания, является генератором тока, выходной электрический сигнал которого, эквивалентный

экспоненциально затухающим крутильным колебаниям, подается на вход устройства анализа параметров. С помощью этого устройства измеряются период свободных колебаний и коэффициент затухания. Считывание длительности периода осуществляется с помощью электронно-счетного частотомера ЧЗ-30.

В известных работах измерение декремента затухания производилось путем детектирования экспоненциально затухающих колебаний выходного сигнала резонаторов с последующим отфильтровыванием высокочастотной составляющей и измерением времени спада экспоненты, огибающей колебания, от одного заданного уровня до другого. Этот метод применим при максимальной величине коэффициента затухания порядка $7 \cdot 10^3$ — 10^4 1/сек. При исследовании вязкоупругих жидкостей коэффициент затухания достигает значений $3 \cdot 10^4$ — $3,5 \cdot 10^4$ 1/сек, спектр сигнала резонатора становится очень широким и отфильтровывание приводит к значительному искажению огибающей, т. е. к большим погрешностям измерений.

В разработанном приборе измерение коэффициента затухания производится осциллографическим методом.

Вязкоупругие свойства жидкостей измерялись косвенным вибрационным методом с помощью кварцевых цилиндрических резонаторов на крутильных колебаниях.

Измерения проводились при статических давлениях и температурах. Погрешность установки температуры в интервале 20° — 150° не больше $0,2^\circ\text{C}$. Для поддержания постоянства заданной температуры камера высокого давления термостатировалась в течение 5—6 часов.

Погрешность установки заданного статического давления в интервале 1 — 6000 кгс/см² не превышала 2%.

Для исключения систематических погрешностей из-за влияния гидростатического сжатия и температуры на собственную частоту кварцевых резонаторов проводилась калибровка их частоты по давлению и температуре.

Геометрические постоянные резонатора определялись калибровкой в эталонных жидкостях при постоянной температуре. (Эталонными жидкостями являлись: н-гексан, н-гептан, н-октан, н-гексадекан). При этом измерялись коэффициент затухания и изменение частоты по сравнению с вакуумом. Затем постоянные рассчитывались, исходя из значения вязкости эталонной жидкости для температуры, при которой проводилась калибровка резонатора. Погрешность определения постоянных резонаторов не превышала 0,5%.

Частота и коэффициент затухания в вакууме и исследуемой жидкости определялись при ударном возбуждении из исследований характеристик переходного процесса резонатора. Перед измерениями поверхность кварцевого резонатора тщательно обезжиривалась. Затем резонатор устанавливался в корпусе датчика, который после заливки испытуемой жидкостью помещался

в измерительную камеру высокого давления. После этого камера термостатировалась и производилось повышение давления. Для исключения ошибки, обусловленной запаздыванием вязкости при гидростатическом сжатии, после каждого нагружения до необходимой величины давления перед измерениями делалась часовая выдержка. Затем измерялись период свободных колебаний и коэффициент затухания системы резонатор — жидкость.

Окончательно вязкость и время релаксации на основании измеренных коэффициента затухания и изменения собственной частоты резонатора в жидкости по сравнению с вакуумом рассчитывались на ЭВМ, исходя из совместного решения уравнений [1].

$$\varepsilon = \frac{2\varepsilon_0 I_0 + \frac{k}{s} \left(\frac{2\eta(\omega)}{R} + \frac{1}{s} \sqrt{\frac{\omega\eta(\omega)\rho}{2}} \right)}{2 \left[I_0 + \frac{k}{\omega} \left(s \sqrt{\frac{\omega\eta(\omega)\rho}{2}} - \omega t_{\text{рел}} \frac{2\eta(\omega)}{R} \right) \right]},$$

$$\Delta f = K \left(s \sqrt{\frac{\omega\eta(\omega)\rho}{2}} - \omega t_{\text{рел}} \frac{2\eta(\omega)}{R} \right). \quad (1)$$

Здесь I_0 — момент инерции кварцевого цилиндра; k и K — его геометрические постоянные; ε_0 — коэффициент затухания кварцевого цилиндра в вакууме; $s = (\sqrt{1 + \omega^2 t_{\text{рел}}^2} - \omega t_{\text{рел}})^{1/2}$ — коэффициент не-ньютоновости; $t_{\text{рел}}$ — время релаксации; $\eta(\omega) = \eta / (1 + \omega^2 t_{\text{рел}}^2)$ — динамическая вязкость исследуемой жидкости; η , ρ — вязкость и плотность жидкости; R — радиус цилиндра; ω — циклическая собственная частота цилиндра в жидкости. Вязкость ньютоновских жидкостей рассчитывалась из уравнения [1]

$$\eta\rho = \left[\frac{2I_0(\varepsilon - \varepsilon_0)}{k} \right]^2 \frac{1}{\pi f},$$

где ε и ε_0 — коэффициенты затухания резонатора в жидкости и в вакууме.

В принятой методике экспериментального исследования вязкоупругих свойств жидкостей, как правило, не проводилось репликации измерений по давлению и температуре в связи со сложностью создания высоких давлений и длительностью процесса установления заданной температуры. Поэтому показания, считываемые с приборов контроля давления и температуры и уточненные по калибровочным кривым, принимались за истинные и в дальнейшем не учитывалось влияние их погрешностей на окончательную ошибку измерений. Репликации по давлению и температуре проводились только в случае обнаружения промахов в результатах измерений.

Проведенный анализ погрешностей разработанного метода показал, что при исследованиях вязкоупругих свойств жидкостей ошибка измерений вязкости не превышает 6% во всем диапа-

зоне измерений коэффициента затухания, а ошибка измерений времени релаксации не превышает 13% на границе ньютоновского поведения жидкостей. При исследованиях ньютоновских жидкостей для снижения ошибок измерений целесообразно использовать расчетные уравнения (1), положив $t_{ред}=0$ и $s=1$. Тогда измеренные коэффициент затухания и изменение частоты резонатора однозначно определяются вязкостью. Анализ погрешностей вязкостей ньютоновских жидкостей, рассчитанных по данным измерений из этих уравнений, показал, что при расчете вязкости из измерений коэффициента затухания относительная ошибка не превышает 6%, а из измерений частоты — 3%. Совпадение вязкостей, рассчитанных по этим уравнениям, является достаточным условием для подтверждения ньютоновского поведения жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяченко Б. П. Исследование метода измерения вязкоупругих свойств жидкостей при высоких давлениях. Автореферат диссертации, Куйбышевский авиационный институт, 1973.

С. В. ПИНЕГИН, Ю. Н. БЛОХИН

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ СКОРОСТЕЙ

По экспериментальному исследованию сопротивления при качении накоплен довольно обширный материал. Эксперименты проводились, в основном, при малых скоростях и нагрузках применительно к контакту колесо-рельс (работы С. Кулона, Н. Вуда, М. Херси, В. Бентона и др.), а также при возвратно-поступательном или качательном движении шара или цилиндра по плоскости (работы Д. В. Конвисарова, Хисада, Д. Тейбора, Р. Друтовского, Л. Б. Гафта, Е. Р. Красковского, В. Д. Рабко и др.).

При моделировании работы роликовых подшипников, зубчатых и фрикционных передач использовали роликовую аналогию (Ю. Н. Дроздов, Е. Р. Красковский, Н. Ф. Кузьмин, В. С. Порохов, Б. Г. Рахнович и др.).

Однако существующие роликовые машины позволяли проводить исследование процесса качения в узком диапазоне скоростей качения со скольжением. Использование на роликовой машине метода выбега не позволяло использовать основное преимущество роликовых машин, т. е. раздельное влияние скорости и нагрузки на процесс качения. Применение маятниковых устройств