

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

А. И. Приданцев, А. В. Римашевский, А. Н. Соловьев

(Москва)

В литературе опубликованы различные методы, основанные на непрерывных измерениях амплитуды или сдвига фаз при периодических колебаниях (с достаточно высокой частотой) различных тел, погруженных в жидкость [1-5]; при этом применяются различные электронные схемы. «Вибрационные» вискозиметры имеют относительно малую точность (5 ÷ 10%).

Ниже описываются вариант вибрационного метода, прибор и принцип его работы для непрерывного измерения и записи значений вязкости различных, в том числе агрессивных, жидкостей в широком интервале изменения вязкости, температуры и давления.

1. Пусть тонкая пластина погружена в жидкость и совершает плоские вынужденные колебания частотой ω . Согласно принципу Даламбера, сила инерции равна силе, возбуждающей колебания, минус сила сопротивления пружины, минус сила вязкого трения по двум поверхностям пластины

$$\frac{G}{g} \frac{d^2\zeta}{dt^2} = F_0 \sin \omega t - k\zeta - 2S \sqrt{\frac{\rho\mu\omega}{2}} \frac{d\zeta}{dt} \quad (1.1)$$

Здесь G — вес колеблющейся системы; g — ускорение силы тяжести; F_0 — максимальное значение силы, возбуждающей колебания; ζ — смещение пластины от положения равновесия; k — жесткость пружины; S — площадь одной поверхности пластины; ρ — плотность жидкости; μ — динамическая вязкость жидкости; t — время.

Уравнение можно переписать в виде

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} + a_1 \frac{d\zeta}{dt} + a_2\zeta = a_3 \sin \omega t \quad (1.2)$$

Решение для установившегося режима, т. е. для $t \rightarrow \infty$, имеет вид

$$\zeta = \frac{a_3}{\sqrt{(\omega^2 - a_2)^2 + \omega^2 a_1^2}} \sin \left[\omega t - \arctg \frac{\omega a_1}{\omega^2 - a_2} \right] \quad (1.3)$$

Вязкость входит в a_1 , и, следовательно, для ее определения можно измерять амплитуду колебаний или сдвиг фаз относительно задающей частоты.

Была произведена оценка возможности измерения сдвига фаз. Оказалось, что при приемлемых размерах и весе подвешенной системы для измерения вязкости порядка 1 спузз нужно иметь частоту колебаний порядка десятых долей герца. Не говоря о трудности осуществления колебаний с такой малой частотой, укажем, что при такой частоте сдвиговые волны будут затухать с расстоянием слабо и, следовательно, будут оказывать влияние стенки сосуда. Значительно удобнее измерять амплитуду колебаний.

Из формулы (1.3) видно, что лучше всего измерять амплитуду в случае, если частота вынуждающей силы будет равна собственной частоте колебаний подвешенной системы ω_* . При этом $\omega_*^2 = \omega^2 = a_2$ и амплитуда колебаний системы будет максимальной. Расчетная формула в этом случае имеет вид

$$\mu\rho = \frac{C_1}{\zeta_{\max}^2} \quad (1.4)$$

Таким образом, для определения вязкости жидкости необходимо знать ее плотность и измерять только одну величину ζ_{\max} . В реальном случае, кроме сопротивления от трения о жидкость, подвешенная система будет испытывать и другие тормозящие влияния (сопротивление торцовых поверхностей пластины, трение о воздух, влияние поверхностного натяжения, сопротивление упругого элемента и т. п.). Эти добавочные силы могут быть пропорциональны смещению ζ или производной $d\zeta/dt$. Предполагая, что коэффициенты пропорциональности есть величины постоянные, можно получить расчетную формулу в виде

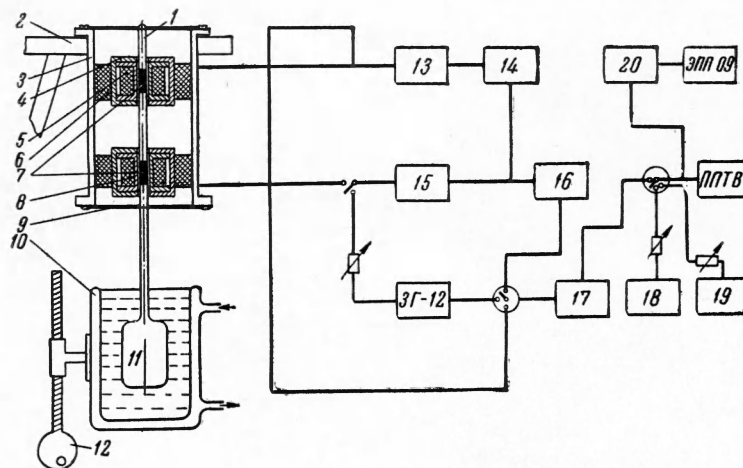
$$\mu\rho = \frac{C_1}{\zeta_{\max}^2} - C_2 \quad (C_2 = \text{const}) \quad (1.5)$$

Ввиду трудности непосредственного определения C_2 метод следует считать относительным, т. е. определять константы прибора по жидкости с известными вязкостью и плотностью. С изменением температуры будет изменяться величина рабочей поверхности зонда, поэтому в формулу следует ввести поправку

$$(1 + 2\alpha t)^2 \mu\rho = \frac{C_1}{\zeta_{\max}^2} - C_2 \quad (1.6)$$

С изменением вязкости при изменении температуры будет изменяться толщина слоя жидкости, увлекаемого зондом. Это изменяет эффективную массу системы и резонансную частоту. С увеличением частоты колебаний добавка к массе подвешенной системы за счет слоя жидкости уменьшается. Следует подбирать параметры системы так, чтобы ω_* оставалась практически постоянной.

Как видно из формулы (1.6), в опыте нужно измерять лишь амплитуду колебаний и это дает возможность создать достаточно простой прибор для непрерывного измерения вязкости жидкости.



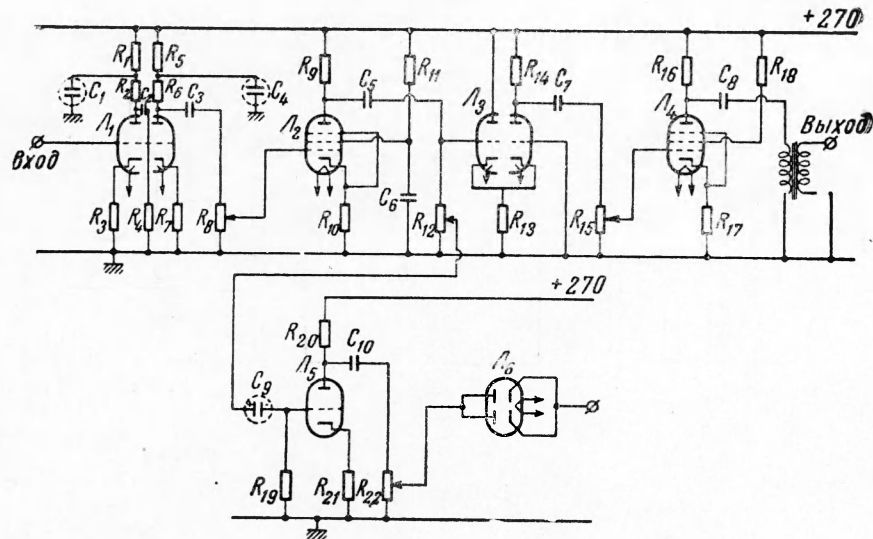
Фиг. 1. Схема установки

2. На основе изложенного была собрана экспериментальная установка. Принципиальная схема ее приведена на фиг. 1. Зонд 11 выполнен в виде пластинки из нержавеющей стали размером $30 \times 40 \times 0.2$ мм. Пластика приварена к расплюсненному концу трубки 1 из нержавеющей стали диаметром 5×0.2 , длиной $l = 200$ мм. Внутри трубки на расстоянии 70 мм один от другого запрессованы цилиндрики 7 из магнитного сплава «альнико» высотой 15 мм. Трубка с пластинкой подвешена на проволочных растяжках 9, закрепленных винтами на двух торцах цилиндра 3. Внутри цилиндра на прокладках из мягкой пористой резины 6 вставлены две катушки 5 и 8 в железных экранах 4. Одна катушка (вместе с магнитом) служит для возбуждения, а другая — для регистрации колебаний. Цилиндр подвешен на массивном кронштейне 2, закрепленном на капитальной стене. Приняты меры к исключению или резкому уменьшению электрических, механических и иных помех (магнитные экраны, мягкие подвесы, массивные опоры и т. д.). Исследуемая жидкость помещается в стеклянный стакан 10 с двойными стенками. Между стенками циркулирует вода или другая жидкость из термостата. Температура жидкости в термостате измеряется образцовым термометром с ценой деления 0.1° С. Также измеряется температура исследуемой жидкости вблизи пластинки зонда при помощи микротермометра в чехле из нержавеющей стали. Блок-схема электронной части установки приведена на фиг. 1, где 13 — усилитель мощности, 14 — ограничитель, 15 и 16 — усилители напряжения, 17 — выпрямитель, 18 — источник напряжения накала ламп, 19 — источник анодного напряжения; 20 — компенсационная схема.

Колебания системы возбуждаются от «камертонного» генератора (фиг. 2). Роль камертона выполняет в данном случае сама подвешенная система. Сигнал от приемной катушки подается на вход усилителя напряжения. Усилитель имеет три каскада и собран на лампах 6Н2П и 6Ж4П. Далее сигнал попадает на ограничитель (6Н1П), после которого сигнал имеет постоянную величину, не зависящую от входного сигнала. Сигнал от ограничителя подается на усилитель мощности (6П14П) и через выходной трансформатор на задающую катушку. Механическая связь приемной и задающей катушек выполняет роль глубокой положительной обратной связи, поэтому вся схема является генератором, частота которого равна собственной частоте подвешенной системы.

В схеме предусмотрена возможность плавного изменения коэффициентов усиления в усилителях напряжения и мощности. Наличие ограничителя обеспечивает подачу постоянного, не зависящего от ρ_1 , сигнала на задающую катушку; таким образом, амплитуда колебаний подвешенной системы зависит только от параметра ρ_1 исследуемой жидкости и геометрических параметров системы. Для измерения этой амплитуды собрана измерительная схема, состоящая из усилителя напряжения (6С2П), выпрями-

теля (6Х2П) и потенциометра постоянного тока типа ППТВ. Сигнал на измерительную схему берется с выхода усилителя напряжения. Кроме такой измерительной схемы, предназначенной для точных измерений, предусмотрены еще две возможности. Грубые измерения производятся катодным вольтметром, включаемым на выход усилителя напряжения. Для проведения непрерывных измерений вместо ППТВ включается электронный самопишущий потенциометр ЭПП-09. Одновременно на другом потенциометре записывается температура исследуемой жидкости. Для повышения точности измерений на ЭПП подается не весь сигнал. Часть сигнала компенсируется напряжением вспомогательной батареи. Таким образом, удается значительно растянуть шкалу и получить точность отсчета по шкале электронного потенциометра примерно такую же как на ППТВ.



Фиг. 2. Камертонный генератор и измерительная схема:

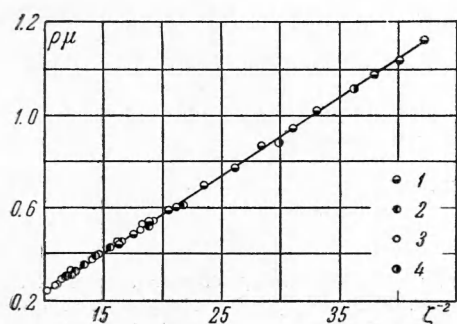
L_1 6Н2П	R_5 10 ком	R_{15} 180 ком	C_2 0.04 мкф
L_2 6ЖЧП	R_6 100 ком	R_{16} 4.1 ком	C_3 0.04 мкф
L_3 6Н1П	R_7 650 ком	R_{17} 160 ом	C_4 50 мкф
L_4 6П14П	R_8 470 ком	R_{18} 51 ком	C_5 0.04 мкф
L_5 6С2П	R_9 91 ком	R_{19} 750 ком	C_6 0.5 мкф
L_6 6Х2П	R_{10} 560 ком	R_{20} 10 ком	C_7 0.04 мкф
R_1 10 ком	R_{11} 300 ком	R_{21} 100 ом	C_8 2.0 мкф
R_2 100 ком	R_{12} 470 ком	R_{22} 100 ком	C_9 30.0 мкф
R_3 650 ом	R_{13} 8.2 ком	C_1 50 мкф	C_{10} 0.1 мкф
R_4 470 ком	R_{14} 62 ком		

Серьезное внимание обращалось на стабильность работы электронной схемы и проверку стабильности. Анодное питание осуществлялось от сухих анодных батарей БАС-Г-80-У-2.1, а питание накала ламп — от аккумуляторов. Со временем напряжение батарей и аккумуляторов падает; кроме того, элементы электронной схемы могут также изменяться от температуры и других причин. Поэтому необходимо периодически контролировать постоянство параметров схемы и постоянство анодного напряжения и напряжения накала. Для проверки постоянства параметров схемы на вход первого усилителя напряжения вместо рабочего сигнала от приемной катушки подается сигнал от звукового генератора, причем частота и амплитуда контрольного сигнала подбираются близкими к рабочему сигналу. Приемная катушка отключается и производится измерение напряжения на выходном трансформаторе и напряжения после выпрямителя. Все измерения проводятся на постоянном токе, т. е. контрольный сигнал и напряжение на выходном трансформаторе предварительно выпрямляются рабочим выпрямителем. Напряжение батареи, аккумуляторов и величина контрольного сигнала периодически измеряются при помощи потенциометра ППТВ, и если они изменяются, то их приводят к прежнему значению, изменяя включенные в цепи анода, накала и ЗГ-12 сопротивления. Таким образом, осуществляется контроль как за стабильностью питания, так и за постоянством параметров схемы. Все переключения осуществляются одним пятипозиционным переключателем.

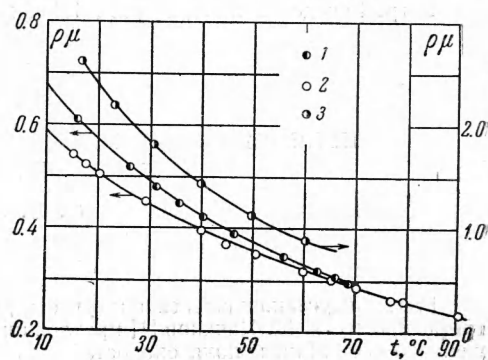
Проведенные методические эксперименты показали, что при стабильном питании после 2—3-часового прогрева схема работает достаточно стабильно. Отклонения не превышают $0.05 \div 0.1\%$. В основном этими мерами контроля объясняется значитель-

ное повышение точности данного метода до $0.5 \div 1\%$ в сравнении с другими вибрационными методами измерения вязкости [2^{-4}], которые имели погрешности не менее 5% .

3. Опыты проводились следующим образом. Исследуемая жидкость заливалась в рабочий стакан. Включались насос и нагреватели термостата. При помощи контактного термометра устанавливалась желаемая температура. Включалась и прогревалась в течение 2—3 часов электронная схема. Устанавливались напряжения накала и анода. Устанавливался уровень жидкости относительно зонда при помощи механизма, плавно перемещающего стакан по вертикали. После установления стационарного режима измерялись не менее трех раз рабочее и контрольное напряжения на выходе из измерительной схемы, напряжения анодной и накальной батарей, величина контрольного сигнала от генератора ЗГ-12, рабочее и контрольное напряжения на задаю-



Фиг. 3. Зависимость $\rho\mu$ от ζ^{-2} для четырех жидкостей: 1 — этиловый спирт, 2 — бензол, 3 — толуол, 4 — *n*-бутиловый спирт



Фиг. 4. Сравнение измеренных значений $\rho\mu$ с табличными: 1 — бензол, 2 — толуол, 3 — *n*-бутиловый спирт

щей катушке и температура жидкости. После этого система переводилась на новый температурный уровень и производились очередные измерения указанных выше величин. Расчет велся по среднеарифметическим значениям измеренных величин, причем отклонения от среднего значения не превышали, как правило, $0.1 \div 0.3\%$. Вводились поправки на изменение параметров схемы, которые в большинстве случаев не превышали 0.5% . Основная поправка была за счет некоторого несовершенства ограничителя, однако и она была малой. Так при изменении амплитуды колебаний системы в три раза амплитуда сигнала после ограничителя изменялась не более чем на 1.5% . Проведены были опыты на четырех жидкостях (этиловом спирте, толуоле, бензоле и *n*-бутиловом спирте) при температурах $10 \div 70^\circ\text{C}$. Плотность и вязкость этих жидкостей была определена нами при помощи капиллярного вискозиметра и прибора для измерения плотности методом взвешивания грузика известного объема в исследуемой жидкости. Погрешность определения $\rho\mu$ оценивается величиной порядка $0.5 \div 1\%$. Измеренные значения $\rho\mu$ для бензола и *n*-бутилового спирта совпадают с табличными значениями. Плотность и вязкость этилового спирта совпадают с табличными значениями для смеси спирта и воды при 92.4% спирта по весу. Для технического толуола измеренные значения лежат выше табличных примерно на 7% . Согласно теории в координатах $\rho\mu$ и ζ_{\max}^{-2} точки должны укладываться на прямые линии. Как видно из графика фиг. 3, точки для каждой жидкости хорошо укладываются на прямую линию, причем среднее отклонение по спирту не превышает 1% , по *n*-бутиловому спирту 0.4% , по бензолу 1.3% и по толуолу 1.2% . Если определить постоянные C_1 и C_2 из опытов со спиртом, то можно по измеренным ζ_{\max}^{-2} подсчитать значения $\rho\mu$ для остальных жидкостей. Такие расчеты были проделаны и результаты их представлены на графиках. На фиг. 4 нанесены полученные из опыта экспериментальные точки. Сплошными линиями нанесены табличные значения. Из графика видно, что результаты измерений хорошо согласуются с табличными значениями. Разброс точек в среднем не превышает 1.5% для бензола и *n*-бутилового спирта и 2.2% для толуола.

Были проделаны опыты по непрерывному измерению вязкости при плавном нагреве и охлаждении. Опыты показали возможность записи и последующей обработки записей амплитуды и температуры двумя различными потенциометрами. Обнаружено некоторое расслоение точек в середине интервала (3%), связанное с недостаточным выравниванием температуры в жидкости с малой теплопроводностью. Необходимо подобрать соответствующую скорость нагрева.

Поступила 28 XII 1960

ЛИТЕРАТУРА

1. Roth W., Rich S. R. A New Method for Continuous Viscosity Measurement. General Theory of the Ultra — Viscoson. Journal of Applied Physics, 1953, 24, 7, 940—950.
2. Woodward J. G. Vibrating — Plate Viscometer. Electronics, 1952, 25, 2, 98—100.
3. Иванов П. А. и Крутоголов В. Д. Приборы непрерывного измерения вязкости. Изв. вузов. Приборостроение, 1958, № 2, стр. 69—72.
4. Росин Г. С. Вибрационный метод измерения абсолютной вязкости. Заводская лаборатория, 1960, 26, 6, 723.
5. Лесков Г. И. и Шевченко Г. Д. Электрический вибрационный вискозиметр. Заводская лаборатория, 1956, 22, 4, 492—496.

**ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ДИСКОВ В СТАДИИ
НЕУСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ**

О. В. Соснин

(Новосибирск)

Расчет неустановившейся ползучести дисков обычно проводится численным интегрированием. Л. М. Качанов [1] предложил приближенный прием для анализа напряженного состояния и поля скоростей деформации при неустановившейся ползучести. Этот прием состоит в том, что перераспределение напряжений из начального упругого состояния к предельному состоянию установившейся ползучести описывается при помощи одной только функции времени. Принимая за исходные уравнения уравнения теории течения, Л. М. Качанов для нахождения этой функции пользуется сформулированным им вариационным принципом.

Ниже предлагается приближенный метод расчета неустановившейся ползучести дисков. Выражения для напряжений берутся в той же форме, что и в работе Л. М. Качанова [1], но неизвестная функция времени определяется из условия минимума квадратичной ошибки вследствие невыполнения условий совместности деформаций.

1. Пусть σ_r^0 и σ_θ^0 — исходное напряженное состояние в диске (упругое), σ_r^∞ и σ_θ^∞ — предельное состояние. Будем считать, что напряженное состояние меняется в зависимости от одной функции $\varphi(t)$ по следующим формулам:

$$\sigma_r = \sigma_r^0 - (\sigma_r^0 - \sigma_r^\infty) \varphi(t), \quad \sigma_\theta = \sigma_\theta^0 - (\sigma_\theta^0 - \sigma_\theta^\infty) \varphi(t) \quad (1.1)$$

Для любого момента времени полные радиальные и тангенциальные деформации будут соответственно

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) + \varepsilon_r^p + \alpha T, \quad \varepsilon_\theta = \frac{1}{E} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) + \varepsilon_\theta^p + \alpha T \quad (1.2)$$

где ε_r^p и ε_θ^p — пластические компоненты деформации. Беря уравнение ползучести по теории упрочнения

$$p^\alpha dp = k \exp \frac{s}{A} dt \quad (s = \beta_1 \sigma_r + \beta_2 \sigma_\theta) \quad (1.3)$$

где p — максимальный сдвиг, s — максимальное касательное напряжение и используя ассоциированный закон течения [2], получим выражения

$$\varepsilon_r^p = \int_0^p \beta_1 dp, \quad \varepsilon_\theta^p = \int_0^p \beta_2 dp \quad (1.4)$$

Здесь β_1 и β_2 могут принять любое из трех значений — 1, 0, +1. Считая, что в интервале времени от t_i до t_{i+1} величину s можно считать постоянной, проинтегрируем уравнение (1.3), в результате чего найдем $\Delta p_i = p_{i+1} - p_i$ и по формулам (1.4) определим приращение радиальной и тангенциальной пластической деформации $\Delta \varepsilon_r^p$ и $\Delta \varepsilon_\theta^p$.