

УДК 532.137

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ КАПИЛЛЯРНЫМ ВИСКОЗИМЕТРОМ С ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИГЛОЙ¹

© К. С. Мерзляков, С. И. Штин, Н. П. Углев²*Статья поступила 7 июля 2015 г.*

Рассмотрено использование капиллярного вискозиметра с измерительной иглой в качестве рабочего тела для определения вязкости малых объемов малопрозрачных жидкостей. Описан принцип действия прибора, и на основе уравнения Стокса выведена рабочая формула вискозиметра. Представлены результаты измерения вязкости воды в интервале от 25 до 70 °С. Показано, что полученные результаты совпадают с литературными данными с высокой точностью. Проведен анализ распределения давления по периметру перпендикулярного сечения рабочего тела (цилиндрической иглы) при смещении его от центрального положения оси капилляра. По результатам исследования сделан вывод о механизме самофокусировки измерительной системы.

Ключевые слова: капиллярный вискозиметр; вязкость.

Знание такого важного свойства, как вязкость, необходимо при гидродинамических расчетах в случае использования жидкостей в технических устройствах. Один из наиболее точных и удобных приборов для ее определения — вискозиметр Хепплера, основанный на принципе измерения скорости движения в жидкости симметричного тела (измерительного элемента). Недостатки метода: возможность непрямолинейной траектории движения измерительного элемента, достаточного большой объем исследуемого вещества, затруднения при исследовании малопрозрачных жидкостей, сложность возврата измерительного элемента в исходное положение при проведении серии измерений (особенно в условиях высоких температур).

В значительной степени эти затруднения снимаются при использовании узкого стеклянного или кварцевого капилляра и движущейся внутри него металлической иглы в качестве измерительного элемента. При этом зазор между стенкой капилляра и иглой может составлять несколько десятков микрон.

При движении иглы вниз под действием силы тяжести вытесняемая жидкость поднимается вверх по зазору в ламинарном режиме, создавая силу трения, уравновешивающую остаточный вес измерительного элемента. Длина иглы составляет 20 – 25 % длины капилляра (рис. 1).

Скорость движения иглы определяют по времени прохождения ее нижним и верхним концами соответствующих рисок, нанесенных на капилляр. Таким образом, за один проход фиксируют четыре временных интервала, последующее усреднение по которым повышает общую точность определения вязкости.

Небольшая толщина слоя жидкости в зазоре позволяет исследовать малопрозрачные среды, а ферромагнитный сплав иглы облегчает возврат измерительного элемента в верхнюю часть прибора (начальное положение). При этом возвращающий магнит имеет вид кольца, охватывающего капилляр. В связи с малой толщиной стенки магнитный захват и возврат иглы проходят за несколько секунд, в течение которых магнит не успевает разогреться выше точки Кюри и заметно повлиять на температуру исследуемой жидкости.

Для баланса сил при движении измерительного элемента, используя уравнения Стокса, можно записать

$$\mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = \frac{dp}{dz}, \quad (1)$$

где μ — динамический коэффициент вязкости, w — скорость движения жидкости, dp/dz — градиент давления по длине капилляра z .

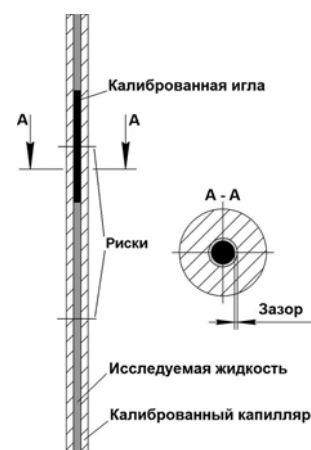


Рис. 1. Схема капиллярного вискозиметра с калиброванной иглой

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.31.0016).

² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия; e-mail: cs_merzlyakov@list.ru

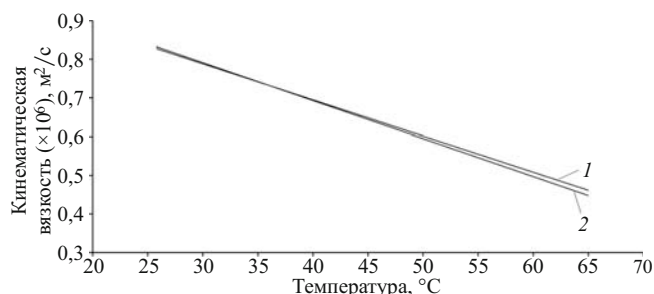


Рис. 2. Зависимости кинематической вязкости воды от температуры, полученные при помощи вискозиметра с иглой (1) и по справочным данным (2)

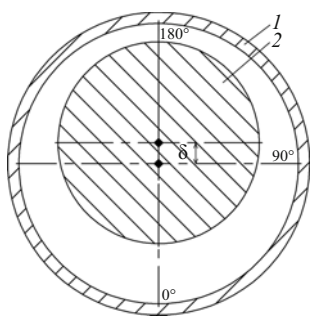


Рис. 3. Схема смещения иглы от центра: 1 — капилляр; 2 — калиброванная игла

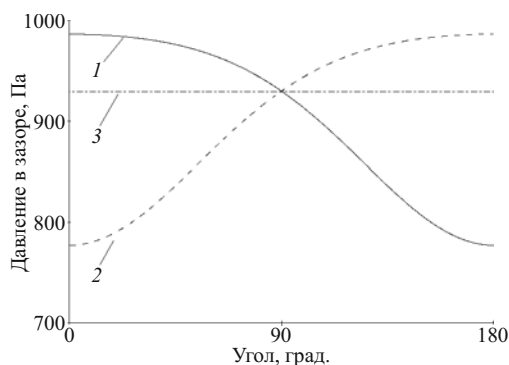


Рис. 4. Распределение давления в кольцевом зазоре при смещении иглы от центральной оси: 1 — вниз [к отметке 0° (см. рис. 3)]; 2 — вверх (к отметке 180°); 3 — положение иглы в центре капилляра

Общее решение уравнения (1) в цилиндрических координатах [1]

$$w(\rho) = -\frac{\Delta p}{4\mu l} \rho^2 + C_1 \ln \rho + C_2, \quad (2)$$

где ρ — радиус, C_1 и C_2 — постоянные, определяемые из начальных условий, позволяет найти профиль скоростей в зазоре между двумя соосными цилиндрами (внутренней поверхностью капилляра и иглой) при следующих условиях: скорость жидкости на стенке капилляра равна нулю, скорость жидкости на стенке

падающей со скоростью v иглы равна $-v$. В этом случае решение (2) приобретает вид:

$$w(\rho) = -d\rho^2 + \frac{da^2 - db^2 + v}{\ln a - \ln b} \ln \rho + v + da^2 - \frac{da^2 - db^2 + v}{\ln a - \ln b} \ln a, \quad (3)$$

где $d = \Delta p / 4\mu l$; l — длина измерительного элемента; a и b — радиусы иглы и капилляра.

При установившемся движении иглы должен соблюдаться баланс сил: сопротивление движению равно весу иглы с учетом силы Архимеда. Учитывая это, получаем рабочую формулу вискозиметра:

$$\mu(\Delta\tau) = \frac{(b^2 - a^2)^2 (b - a)(gm - \pi\gamma \ln a^2)}{12\pi l h a^4 (b + a)} \Delta\tau = K\Delta\tau, \quad (4)$$

где m — масса иглы; γ — удельный вес исследуемой жидкости; h — расстояние между рисками на капилляре; $\Delta\tau$ — длительность прохождения иглой расстояния h . Оценка показала, что константа вискозиметра K малочувствительна к изменению радиусов капилляра и иглы при изменении температуры, что можно учесть аналитически.

Проверку предложенной методики провели при исследовании вязкости воды в диапазоне температур 25 – 70 °C (рис. 2). Постоянную K определяли по одной точке при 25 °C. Видно, что результаты измерения вязкости в исследуемом температурном диапазоне практически полностью совпадают со справочными данными [2].

Один из возможных недостатков предлагаемого подхода — прилипание измерительного элемента ко внутренней стенке капилляра, вследствие чего может нарушаться линейное соотношение (4). Для проверки этой возможности проанализировали распределение давления по периметру перпендикулярного сечения цилиндрической иглы при смещении ее из центрального положения [3]. Схема смещения представлена на рис. 3.

Скорость течения вытесняемой жидкости в более широкой части зазора увеличивается, а в узкой снижается из-за изменения локального гидравлического сопротивления. Гидродинамический расчет показал, что в узкой части по сравнению с широкой давление больше (рис. 4). Следовательно, случайное смещение иглы от центрального положения вызывает силы, возвращающие измерительный элемент в центр капилляра. Таким образом, можно сказать, что система игла – капилляр обладает свойством самофокусировки, обеспечивающим выполнение уравнения (4).

Таким образом, можно утверждать, что предлагаемый подход полностью идентичен методу измерения, реализованному в вискозиметре Хепплера, и может применяться для исследования вязкости жидкостей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петров А. Г.** Аналитическая гидродинамика: учеб. пособ. для вузов. — М.: Физматлит, 2010. — 520 с.
2. Химическая энциклопедия. В 5 т. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 623 с.
3. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. Изд. 5-е, перераб. — М.: Наука, 1978. — 736 с.

REFERENCES

1. **Petrov A. G.** Analiticheskaya gidrodinamika: ucheb. posob. dlya vuzov [Analytical hydrodynamics. Textbook for High Schools]. — Moscow: Fizmatlit, 2010. — 520 p. [in Russian].
2. Khimicheskaya éntsiklopediya [Chemical encyclopedia]. In 5 vols. — Moscow: Sovet-skaya éntsiklopediya, 1988. — 623 p. [in Russian].
3. **Loitsyanskii L. G.** Mekhanika zhidkosti i gaza [Mechanics of liquid and gas]. 5th edition. — Moscow: Nauka, 1978. — 736 p. [in Russian].