

УДК 532.133

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТЕЙ

Мартюшов Д.А., курсант группа 22-04, II курс

Научный руководитель: Черкасская Е.Н., к.п.н., доцент

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
г. Воронеж

Вязкость – важная физико-химическая характеристика вещества, присущая всем реальным жидкостям и газам. В равновесном состоянии различные макроскопические части фазы вещества покоятся друг относительно друга. При их относительном движении возникают факторы, стремящиеся уменьшить их относительную скорость, то есть возникают силы торможения или вязкости – силы внутреннего трения [1]. С точки зрения молекулярно-кинетической теории вязкость объясняется как тепловым движением молекул, так и наличием молекулярных сил. В газах вязкость обусловлена главным образом молекулярным движением и сводится к переносу импульса упорядоченного движения молекул из одного слоя в другой. В результате обмена молекулами между слоями, импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а движущегося медленнее – увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее, то есть к возникновению сил трения между слоями.

В жидкостях, где расстояния между молекулами гораздо меньше, чем в газах, главную роль в возникновении сил внутреннего трения играет межмолекулярное взаимодействие. Согласно кинетической теории каждая молекула жидкости совершает тепловые колебания около временного положения равновесия, затем скачком переходит в новое временное положение равновесия. Причем многоатомные молекулы, имея несимметричную форму, могут ориентироваться относительно друг друга. При перемещении одних слоев жидкости относительно других происходит нарушение этой ориентировки, что вызывает сопротивление, тем большее, чем ниже температура [2].

Сила внутреннего трения между слоями газа и многих жидкостей определяется эмпирическим уравнением Ньютона:

$$F_{mp} = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения или динамическая вязкость;

dv/dx – градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости в направлении x , перпендикулярном движению слоев; S – площадь трущихся поверхностей слоев, на которую действует сила F [1].

Динамическая вязкость η – это характеристика вещества, численно равная силе внутреннего трения, действующей на единичную площадку S соприкосновения слоев при градиенте скорости, равном единице.

Жидкость, которая подчиняется уравнению Ньютона, называют *ньютоновской*. Динамическая вязкость ньютоновской жидкости зависит от ее строения, наличия примесей, температуры и давления, но не зависит от градиента скорости. При постоянном давлении в узком интервале температур динамическая вязкость ньютоновской жидкости хорошо описывается эмпирической формулой вида:

$$\eta \cong Ae^{b/T}, \quad (2)$$

где величины A и b определяются свойствами конкретной жидкости [3].

Из (2) видно, что при повышении температуры вязкость жидкости сильно уменьшается. Динамическая вязкость касторового масла, например, уменьшается в четыре раза в интервале температур от 18⁰С до 40⁰С.

С повышением температуры жидкости уменьшается среднее время «оседлой жизни» молекул, увеличивается их подвижность, текучесть жидкости увеличивается, что приводит к уменьшению ее вязкости. Свойствами ньютоновской жидкости обладает большинство жидкостей – вода, растворы, низкомолекулярные органические жидкости, и все газы. Зависимость вязкости жидкостей от давления значительно меньше, чем от температуры.

Неньютоновская жидкость – жидкость, вязкость которой зависит от градиента скорости. Свойствами неньютоновской жидкости обладают структурированные дисперсные системы (суспензии, эмульсии), растворы и расплавы некоторых полимеров, многие органические жидкости и др.

В жидкости течение может быть ламинарным (слоистым) или турбулентным (вихревым). Понятия ламинарности и турбулентности применимы как к течению жидкости по трубам, так и к обтеканию ею различных тел. В обоих случаях характер течения зависит от скорости течения, свойств жидкости и характерного линейного размера трубы или обтекаемого тела. Эта зависимость определяется безразмерной величиной, названной числом Рейнольдса (Re)

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}, \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, η – динамическая вязкость данной жидкости, v – скорость потока, d – характерный линейный размер трубы или тела, обтекаемого жидкостью.

Условием ламинарности течения жидкости является выполнение неравенства $Re < Re_{кр}$.

Важной практической задачей является определение динамической вязкости жидкостей. Методы определения вязкости жидкости называются визкозиметрией. Прибор для определения вязкости называются визкозиметром.

Рассмотрим некоторые методы измерения вязкости жидкостей при ламинарности их течения. В зависимости от метода измерения вязкости используют следующие типы визкозиметров.

1. Капиллярный визкозиметр (рис. 1) основан на использовании формулы Пуазейля

$$\eta = \frac{\pi R^4 t \cdot \Delta p}{8VL} = \frac{\pi R^4 t \cdot \rho \cdot \Delta p}{8m \cdot L}, \quad (4)$$

где V и m – объем и масса жидкости, протекающей через капилляр за время t ; R и L – радиус и длина капилляра; Δp – перепад давлений на концах капилляра; η – динамическая вязкость жидкости; ρ – плотность жидкости.

Вязкость определяется по результату измерения времени протекания через капилляр жидкости известной массы под действием силы тяжести при определенном перепаде давлений на концах капилляра.

2. Визкозиметр, основанный на методе Стокса (рис. 2).

При движении тела в вязкой жидкости возникают силы сопротивления. Происхождение этих сил можно объяснить двумя разными механизмами. При небольших скоростях (ламинарное течение, идеальное обтекание), сила сопротивления обусловлена только вязкостью жидкости. В этом случае прилегающие к телу слои движутся вместе с телом. Но граничащие с ними слои жидкости также увлекаются в движение силами межмолекулярного сцепления.

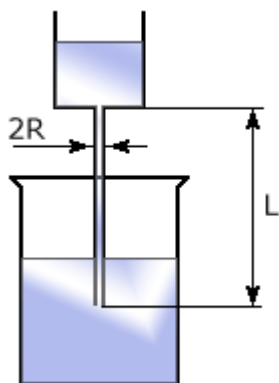


Рисунок 1 – Схема
капиллярного визкозиметра

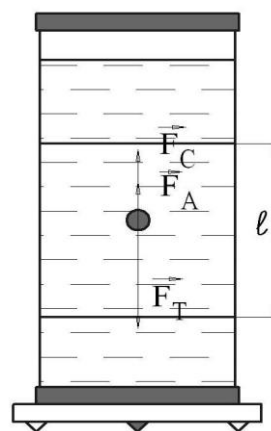


Рисунок 2 – Схема
по методу Стокса

Так создаются силы, тормозящие относительное движение твердого тела в жидкости. Для тел сферической формы (капля, шарик) сила сопротивления пропорциональна вязкости этой жидкости и определяется по формуле Стокса

$$F_C = 6\pi\eta v \cdot r. \quad (5)$$

Второй механизм возникновения сил сопротивления связан с образованием вихрей и различием скоростей движения жидкости перед телом и за ним (сила лобового сопротивления).

Установка для определения динамической вязкости жидкости методом Стокса имеет вид (рис. 2). Условием малости скорости движения шарика в жидкости должно быть выполнение условия $Re = \frac{\rho v \cdot r}{\eta} \ll 1$.

Движение шарика в исследуемой жидкости под действием сил тяжести, сопротивления и архимедовой силы сначала будет равноускоренным, но по мере увеличения скорости шарика растет сила сопротивления и движение шарика становится равномерным. Из условия равномерности движения шарика вытекает формула для определения динамической вязкости жидкости

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18l}, \quad (6)$$

где d - диаметр шарика; ρ и ρ_0 - плотности материала шарика и жидкости;
 l - расстояние, проходимое шариком за время t .

При выполнении эксперимента нужно ввести поправку на радиус R или диаметр D сосуда, например, цилиндра или пробирки [3]

$$K = 1 + 2,4 \frac{r}{R} = 1 + 2,4 \frac{d}{D}. \quad (7)$$

С учетом поправки K

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2t}{18l \cdot (1 + 2,4 \frac{d}{D})}. \quad (8)$$

3. Вязкозиметр ротационный состоит из двух коаксиальных цилиндров. Радиус внутреннего цилиндра - R , радиус внешнего цилиндра $R + \Delta R$ ($\Delta R \ll R$). Пространство между цилиндрами заполняют исследуемой жидкостью до некоторой высоты h . Затем внутренний цилиндр приводят во вращение, прикладывая определенный момент сил M . и измеряют установившуюся частоту вращения ν . Вязкость жидкости вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{KM}{h\nu}, \quad (9)$$

где $K = \frac{\Delta R}{4\pi^2 R^3}$ - постоянная прибора.

Применяя ротационный визкозиметр, можно измерять вязкость при разных угловых скоростях вращения ротора. Это позволяет установить зависимость между вязкостью и градиентом скорости, что важно для неньютоновских жидкостей.

Рассмотренные нами методы определения динамической вязкости жидкости позволяют измерить абсолютное значение вязкости. Существуют и другие методы, в которых необходимо прибегать к сравнительной оценке вязкости исследуемой жидкости с вязкостью какой-либо известной жидкости - калибровочные методы.

Список литературы:

- 1 Трофимова Т.И. Курс физики. – М.: «Академия», 2008. 532 с.
- 2 Базарский О.В., Черкасская Е.Н. Физика. Краткий курс термодинамики. – Воронеж: ВУНЦ ВВС ВВА, 2015. 78 с.
- 3 Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. – Ленинград: Наука, 1975. 226 с.