

Лабораторная работа № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: освоение способа определения коэффициента динамической вязкости жидкости по методу Стокса.

Приборы и принадлежности: стеклянные цилиндры с исследуемыми жидкостями, секундомер, микрометр, шарики, весы, штангенциркуль.

Основные понятия и определения

Вязкость – явление переноса, определяющее диссипацию энергии при деформации среды. Вязкость при деформации сдвига называется *сдвиговой* вязкостью, при деформации всестороннего сжатия – *объемной* вязкостью, при одноосном растяжении – *продольной* вязкостью. Рассеяние энергии при сдвиговой вязкости происходит вследствие переноса импульса, при объемной – путем обмена энергией между степенями свободы при изменении объема, продольной – путем поглощения продольных звуковых волн. В результате возникают напряжения, пропорциональные скоростям деформаций. Количественной характеристикой вязкости являются коэффициенты вязкости.

Коэффициент сдвиговой вязкости η обычно называют вязкостью, определяется как коэффициент пропорциональности между скоростью деформации сдвига $\frac{d\varepsilon}{dt}$ (ε – относительная деформация сдвига, t – время деформации) и возникающим при этом касательным вязким напряжением $\sigma_{\text{вяз}}$:

$$\sigma_{\text{вяз}} = \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad \eta = \frac{\sigma_{\text{вяз}}}{d\varepsilon/dt}. \quad (1)$$

Это соотношение, установленное Ньютоном, справедливо только в том случае, когда η не зависит от скорости деформации. Среды, для которых выполняется это условие, называются *ньютоновскими*.

Коэффициент сдвиговой вязкости равен импульсу, переносимому в единицу времени через единицу площади при $\frac{d\varepsilon}{dt} = 1$. В системе СИ единица вязкости [Па·с]. В гидродинамике часто пользуются понятием коэффициента кинематической вязкости –

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды. Единица измерения $[\nu]$ – м²/с. Величину η часто называют коэффициентом динамической вязкости. Величину, обратную вязкости, иногда называют текучестью.

Коэффициент сдвиговой вязкости η и мощность W_* , рассеиваемая в единице объема за счет вязкости, связаны соотношением:

$$w_* = \eta \left(\frac{d\varepsilon}{dt} \right)^2. \quad (3)$$

Коэффициент объемной вязкости ξ определяется как коэффициент пропорциональности между скоростью объемной деформации и дополнительным давлением, возникающим в среде в результате нарушения термодинамического равновесия.

Коэффициент продольной вязкости λ определяет поглощение продольных звуковых волн и является комбинацией ν и ξ :

$$\lambda = \frac{3}{4} \eta + \xi. \quad (4)$$

Вязкость жидкости, как и другие ее свойства, определяется ее структурой. По своим свойствам жидкости сходны как с газами, так и с твердыми телами. Подобно газам, жидкости принимают форму сосуда, в котором они находятся. Подобно твердым телам, они обладают сравнительно большой плотностью, с трудом поддаются сжатию.

Двойственный характер свойств жидкостей связан с особенностями расположения в них атомов (молекул). В кристаллических твердых телах частицы колеблются около определенных положений равновесия – в узлах кристаллической решетки. В жидкостях, как и в кристаллах, каждая молекула находится в потенциальной яме электрического поля, создаваемого окружающими молекулами. Молекулы колеблются со средней частотой, близкой к частоте колебаний атомов в кристаллических телах (10^{12} Гц), с амплитудой, определяемой размерами объема, предоставленного ей соседними молекулами. Глубина потенциальной ямы в жидкостях больше средней кинетической энергии колеблющейся молекулы, поэтому молекулы колеблются вокруг более или менее стабильных положений равновесия. Однако у жидкостей различие между этими двумя энергиями невелико, так что молекулы нередко выскакивают из «своей» потенциальной ямы и занимают место в другой.

В отличие от твердых тел жидкости обладают «рыхлой» структурой. В них имеются свободные места – «свободные объемы», не занятые частицами, благодаря чему молекулы могут перемещаться, покидая свое место и занимая некоторое новое положение. Таким образом, молекулы медленно перемещаются внутри жидкости, пребывая часть времени около определенных мест равновесия и образуя картину меняющейся во времени пространственной решетки. На современном языке принято говорить, что в жидкости присутствует ближний порядок, а не дальний, т.е. расположение молекул упорядочено в небольших объемах, но перестает замечаться при увеличении расстояния.

Чтобы перейти в новое состояние, молекула должна преодолеть потенциальный барьер, энергия которого превышает среднюю тепловую энергию молекул. Для этого тепловая энергия молекул должна, в результате флуктуации, увеличиться на некоторую величину W , называемую энергией активации. Вследствие этого переходы молекул из одного положения в другое происходят сравнительно редко и тем реже, чем больше энергия

активации. Данный характер движения объясняется как медленной диффузией в жидкостях, так и большей (по сравнению с газами) их вязкостью. В газах вязкость обуславливается происходящим при тепловом движении молекул переносом количества направленного движения. В жидкостях такие переходы существенно замедлены. Количество молекул, имеющих энергии больше W , в соответствии с формулой Больцмана, экспоненциально зависит от W . Я.И. Фенкель показал, что температурная зависимость вязкости η должна выражаться формулой

$$\eta = A(T) \cdot \exp\left(\frac{W}{kT}\right). \quad (5)$$

Формула (5) известна как формула Андраде.

Второй множитель меняется с температурой гораздо быстрее, чем первый, а сама формула носит приближенный характер. Поэтому без большой ошибки первый множитель можно заменить константой A :

$$\eta = A \cdot \exp\left(\frac{W}{kT}\right). \quad (6)$$

Из формулы (6) следует, что вязкость жидкости при повышении температуры должна резко уменьшаться. Современные исследования показали внутреннюю противоречивость этой модели, и формулу Андраде, ее различные обобщения следует рассматривать как эмпирические.

Вязкость жидкостей при постоянной температуре обычно увеличивается с ростом давления. Исключение составляет вода, у которой при температуре ниже 25°C вязкость с ростом давления сначала падает и проходит через минимум. Простые жидкости достаточно хорошо описываются формулой Бачинского

$$\eta = \frac{C}{V - b}, \quad (7)$$

где V – молярный объем, b – несжимаемый объем одного моля, C – постоянная. Таким образом, при постоянном объеме вязкость зависит от температуры гораздо слабее, чем при постоянном давлении, и формула Андраде неприменима.

Всем реальным жидкостям и газам в большей или меньшей степени присуща вязкость (внутреннее трение). Вязкость проявляется в том, что возникшее в газе или жидкости движение после прекращения действия причин, его вызвавших, постепенно прекращается. Слой, движущийся быстрее, действует ускоряюще на более медленно движущийся слой. Наоборот, медленно движущийся слой тормозит более быстро движущийся слой жидкости. Силы внутреннего трения, которые возникают при этом,

направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Причиной вязкости является наложение упорядоченного движения слоев газа с различными скоростями V на тепловое хаотическое движение молекул. Тепловое движение переносит молекулы

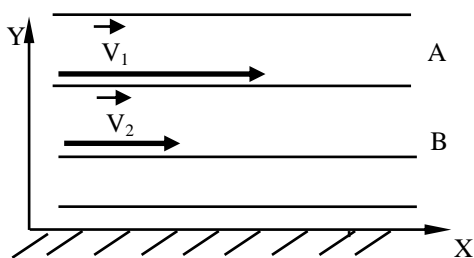


Рис. 1.

из слоя А, движущегося со скоростью v_1 , в слой В, движущийся со скоростью v_2 (рис 1). Если $v_1 > v_2$, то молекулы, ранее бывшие в слое В, оказавшись в слое А, при столкновениях с его молекулами ускоряют свое упорядоченное движение, а упорядоченное движение молекул слоя А замедляется. Наоборот, при переходе молекул из быстрее движущегося слоя А в слой В они переносят большие импульсы mv_1 , и межмолекулярные соударения в слое В ускоряют движение молекул этого слоя. Закон Ньютона в этом случае принимает вид:

$$F = -\eta \frac{dv}{dy} S, \quad (8)$$

где F – сила внутреннего трения, действующая на площадь S поверхности слоя жидкости, $\frac{dv}{dy}$ – градиент скорости – изменение скорости движения слоев на единицу длины в направлении внутренней нормали \vec{n} к поверхности слоя. Сила внутреннего трения противоположна по направлению скорости движения газа.

Метод Стокса для исследования вязкости жидкости основан на измерении скорости падения шарика в жидкости.

На твердый шарик, падающий в вязкой жидкости, действуют три силы (рис. 2.): сила тяжести $\vec{F}_g = \vec{mg}$, подъемная сила $\vec{F}_{\text{арх}}$ (по закону Архимеда) и сила сопротивления движению, обусловленная силами внутреннего трения жидкости $\vec{F}_{\text{сопр}}$. При движении шарика слой жидкости, граничащий с ее поверхностью, прилипает к шарiku и движется со скоростью шарика. Ближайшие смежные слои жидкости также приводятся в движение, но получаемая ими скорость тем меньше, чем дальше они находятся от шарика.

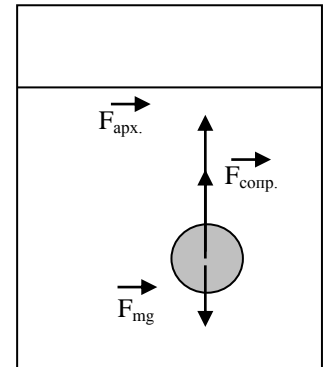


Рис. 2.

Таким образом, при расчете сопротивления следует учитывать сопротивление отдельных слоев жидкости относительно друг друга, а не трение шарика о жидкость. Если шарик падает в жидкость, простирающуюся безгранично по всем направлениям, не оставляя за собой никаких завихрений (если шарик маленький, движется с малой скоростью), то, как показал Стокс, сила сопротивления равна:

$$F = 6\pi r v \eta, \quad (9)$$

где η – коэффициент внутреннего трения жидкости, v – скорость шарика, r – его радиус.

В случае падения шарика в жидкость уравнение движения имеет вид:

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 g - 6\pi r v \eta, \quad (10)$$

где $\frac{4}{3} \pi r^3$ – объем шарика, тогда $V \rho g$ – вес шарика. Объем вытесненной жидкости равен объему шарика, тогда $V \rho_1 g$ – вес жидкости в объеме погруженного шарика.

Все три силы, входящие в правую часть уравнения (10), будут направлены по вертикали: сила тяжести – вниз, подъемная сила и сила сопротивления – вверх. Сила сопротивления с увеличением скорости движения шарика возрастает, а ускорение уменьшается, и наконец шарик достигает такой скорости, при которой ускорение становится равным нулю, тогда уравнение (10) приобретает вид

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_1) \cdot g - 6\pi r v_0 \eta = 0. \quad (11)$$

В этом случае шарик движется с постоянной скоростью v_0 . Такое движение шарика называется установившимся.

Решая уравнение (11) относительно коэффициента вязкости, получаем

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{\rho - \rho_1}{v_0} g r^2. \quad (12)$$

Практически невозможно осуществить падение в безграничной среде, так как всегда жидкость находится в каком-то сосуде, имеющем стенки. Если шарик падает вдоль оси цилиндра тесного сосуда с радиусом R , то учет наличия стенок приводит к следующему выражению для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot g r^2 \frac{\rho - \rho_1}{v_0 \left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right)}. \quad (13)$$

Наличие таких границ жидкости, как дно сосуда и верхняя поверхность жидкости, этой формулой не учитывается.

В системе СИ η измеряется в Па·с, в СГС г/см·с. – пуаз (П).
1 Па·с=10 П.

Задание. Используя метод Стокса определить коэффициенты сдвиговой вязкости воды, глицерина, технического масла.

Экспериментальная установка и порядок выполнения работы

Для измерений используется стеклянный цилиндр, наполненный исследуемой жидкостью (водой, техническим маслом, глицерином).
 $\rho_{\text{глицерина}} = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

На стенках сосуда нанесены две метки на некотором расстоянии l друг от друга. Верхняя метка должна располагаться ниже уровня жидкости с таким расчетом, чтобы скорость шарика к моменту прохождения этой метки успевала установиться. Измерив расстояние между метками, с помощью секундомера определяют время падения шарика t и по формуле $v = \frac{l}{t}$ – скорость шарика. Диаметры шариков измеряют с помощью микрометра, плотность шариков находят по массе и объему.

Опыты повторяют 8–10 раз, результаты заносят в таблицу.

№	l , м	m , кг	r , м	ρ , кг/	t , с	Δt , с	v , м/с	Δv , м/с	η , Па·	$\Delta \eta$, Па·	$\varepsilon\%$
---	------------	-------------	------------	-----------------	------------	-------------------	--------------	---------------------	-----------------	------------------------	-----------------

				m^3					с	с	
1											
.											
.											
10											
Ср											

По результатам работы составляется отчет и формулируются выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление вязкости (внутреннего трения) в жидкости?
2. Что называют коэффициентом вязкости?
3. Как зависит вязкость жидкости от температуры?
4. Как зависит вязкость газов от температуры?
5. При каких условиях наступает установившееся движение шарика?
6. Как проверить правильность выполнения формулы Стокса?
7. Что такое энергия активации?
8. В каких единицах измеряется вязкость?

Литература

1. Савельев И.В. Курс общей физики. – Т.1. – М., 1989.
2. Физический практикум /Под ред. В.И. Ивероной. – М.,1962.
3. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1980.
4. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. – М.: Высшая школа, 1981.