

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

И.Н. АНИСИНА, О.С. КРАВЦОВА, А.Х. КУЛЕЕВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №121

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом
государственного образовательного учреждения высшего профессионального
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2009

УДК 532.13(07)
ББК 22.253я7
А 67

Рецензент
кандидат технических наук, доцент В.К. Шашкова

А 67 Анисина, И.Н.
Определение коэффициента вязкости методом Стокса:
методические указания к лабораторной работе №121 /
И.Н. Анисина, О.С. Кравцова, А.Х. Кулеева.- Оренбург: ИПК
ГОУ ОГУ, 2009.- 9с.

Методические указания включают теоретическое изложение материала, описание методики проведения опыта и контрольные вопросы для самоподготовки.

Методические указания предназначены для выполнения лабораторной работы №121 «Определение коэффициента вязкости методом Стокса» по дисциплине «Физика» для студентов всех специальностей.

ББК 22.253я7

© Анисина И.Н.,
© Кравцова О.Н.,
© Кулеева А.Х., 2009
© ГОУ ОГУ, 2009

Лабораторная работа №121. Определение коэффициента вязкости методом Стокса

Цель работы

- 1 Познакомиться с природой внутреннего трения.
- 2 Измерить коэффициент вязкости.

Теоретические сведения

Известно, что скольжение одного твёрдого тела по поверхности другого, например, книги по поверхности стола, сопровождается появлением силы трения. Она направлена против движения тела. При движении одного слоя жидкости относительно другого вдоль поверхности соприкосновения слоёв возникает сила, препятствующая относительному движению слоёв. Она называется *силой внутреннего или вязкого трения*. Напомним, что силы внутреннего трения имеют место и в газах. Но механизмы возникновения сил вязкого трения в газах выглядят значительно проще, чем в жидкости. Поясним его.

Согласно молекулярно-кинетическим представлениям движение молекул в газовом потоке можно разделить на две части:

- а) хаотическое тепловое перемещение и вращение молекул;
- б) упорядоченное движение молекул вдоль газового потока со скоростью, равной скорости газового потока.

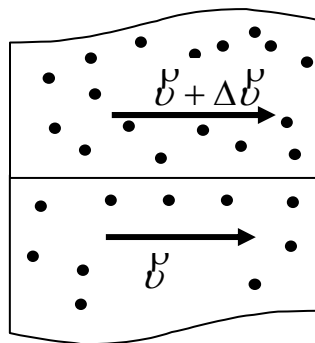


Рисунок 1

Пусть имеется два слоя газа (рисунок 1), касающиеся друг друга. Причем верхний слой движется со скоростью $v + \Delta v$, а нижний – со скоростью v ($\Delta v \ll v$). Движение газов ламинарное, то есть отсутствует конвективное перемещение.

Вследствие теплового движения на границе раздела между слоями будет происходить диффузия молекул одного слоя в другой: молекулы верхнего слоя перескакивают в нижний, а нижнего переходят в верхний слой. Именно эти перескоки ответственны за внутреннее трение в газах. Молекулы, переходящие из нижнего слоя в верхний, обладают скоростью упорядоченного движения v .

Скорость упорядоченного движения молекул верхнего слоя больше и равна $v + \Delta v$. Чтобы «молекулы - пришельцы» начали двигаться вместе с молекулами верхнего слоя, их скорость упорядоченного движения должна увеличиться на Δv . Такое увеличение наступает в результате столкновения с молекулами верхнего слоя. Таким образом «молекулы – пришельцы» отбирают часть кинетической энергии упорядоченного движения от молекул верхнего слоя, оказывая тем самым тормозящее действие на него.

Очевидно, что молекулы, перешедшие из верхнего слоя в нижний, будут оказывать на него противоположное действие – ускорять его, так как их скорость упорядоченного движения на Δv больше скорости упорядоченного движения молекул нижнего слоя.

В жидкости, в отличие от газов, молекулы расположены вплотную друг к другу. Это приводит к существенному усложнению механизма внутреннего трения жидкости. Из-за сильного по сравнению с газами сближения молекул тепловое движение в жидкости становится качественно другим: молекулы жидкости большую часть времени совершают хаотические колебания около некоторого положения равновесия, изредка «перескакивая» из одного соседнего положения в другое. Для каждого такого перескока молекула, во-первых, должна получить энергию, достаточную для разрыв связей с окружающими ее молекулами, во-вторых, около нее должна оказаться вакансия (свободное место), в которую молекула могла бы перейти. Поэтому «перескоки» молекул из одного оседлого положения в другое очень затруднительны и происходят редко (время между перескоками много больше периода колебания молекул около оседлого положения).

При смещении одного слоя по поверхности другого связи между молекулами вдоль границы слоев постоянно разрываются, перестраиваются. Для этого надо совершить работу. Видимо, именно этот механизм – разрыв и перестройка связей между молекулами на границе смещающихся относительно друг друга слоев – ответствен за вязкость жидкостей. Естественно, чем энергичнее тепловое движение, тем легче происходит перестройка связей между молекулами. Поэтому вязкость с ростом температуры уменьшается.

Для пояснения закона, определяющего зависимость силы внутреннего трения от условий движения жидкости и ее свойств, рассмотрим такой пример. По широкому желобу прямоугольного сечения с плоским дном (смотри рисунок 2а) течет жидкость. Желоб наклонен под небольшим углом. Свяжем с ним систему координат: ось x направим вдоль желоба, а ось z перпендикулярно дну. Пусть жидкость течет ламинарно, не перемешиваясь. Мысленно разобьем столб жидкости на слои, параллельные течению и дну желоба. Измерим скорость течения на различном удалении от дна желоба. Иными словами, измерим зависимость скорости v от z . Эту зависимость обозначим $v(z)$.

Обнаружим, что скорость увеличивается по мере удаления от дна, то есть $v(z)$ растет по мере роста z .

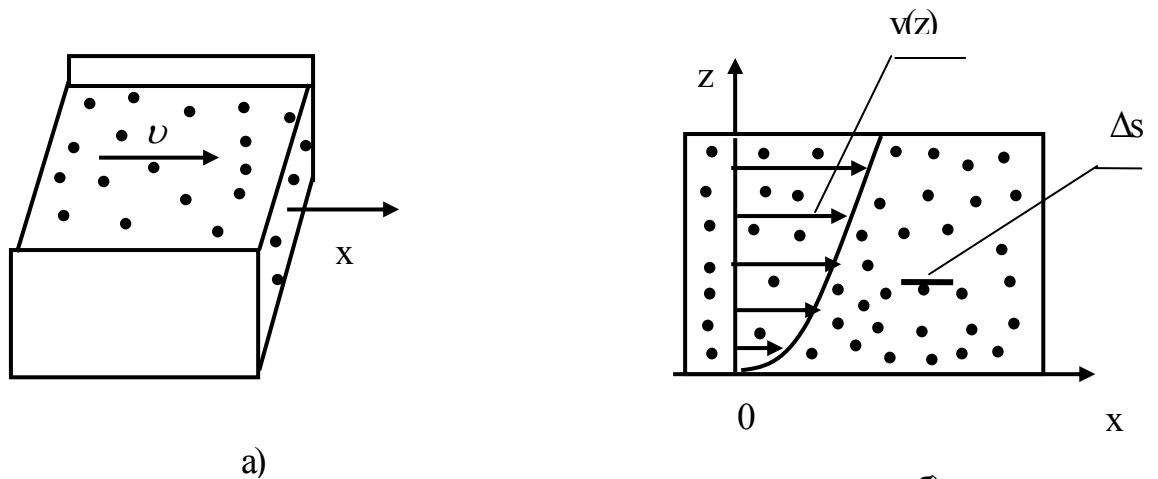


Рисунок 2

Сказанное иллюстрируется на рисунке 2б, где в разрезе изображен участок жидкости и показан график зависимости $\dot{v}$ от z . Стрелками выделена скорость центральной части каждого слоя. Изображенная на рисунке 2б зависимость $\dot{v}$ от z объясняется так. Слой жидкости, непосредственно прилегающий ко дну желоба, практически прилипает к нему. Он тормозит слой, расположенный над ним. Тот, в свою очередь, тормозит выше расположенный слой и т.д. Выделим на границе между слоями, например, третьим и четвертым, площадку Δs . Определим силу внутреннего трения F , действующую вдоль этой площадки.

Получим, что

$$F = \eta \Delta s \left| \frac{\partial v_a}{\partial z} \right|,$$

где η - постоянная, называемая вязкостью или динамической вязкостью жидкости.

$\frac{\partial v_a}{\partial z}$ - градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости жидкости в направлении z , перпендикулярном к направлению движения слоев.

Полученное выражение показывает, что сила внутреннего трения прямо пропорциональна поверхности, вдоль которой она действует, и скорости изменения скорости жидкости в направлении, перпендикулярном скорости движения жидкости.

Эта закономерность впервые была установлена Ньютоном и называется законом Ньютона для внутреннего трения.

Вязкость определяется молекулярным составом жидкости. Она сильно зависит от температуры: с ростом температуры η уменьшается.

В СИ вязкость измеряется в паскаль - секундах сокращенно Па·с. Один паскаль – секунда – это вязкость такой жидкости, в которой на 1 м^2 поверхности между слоями действует сила внутреннего трения 1 Н, когда скорость изменения

скорости жидкости в перпендикулярном к слоям направлении составляет 1 м/с на 1м. Для мало вязких жидкостей $\eta \leq 10^{-3}$ Па·с, у высоко вязких $\eta \geq 1$ Па·с.

Например, при 20° С у воды $\eta = 1,004 \cdot 10^{-3}$ Па·с., бензина – $0,648 \cdot 10^{-3}$ Па·с., этилового спирта – $1,2 \cdot 10^{-3}$ Па·с..

При тех же условиях η чистого глицерина 1,480 Па·с. Заметим, что глицерин гигроскопичен, то есть, способен впитывать пары воды из воздуха. Растворение же воды в глицерине резко уменьшает η .

Для измерения вязкости разработаны специальные методы и приборы, называемые вискозиметрами.

В данной работе измерение η глицерина или касторового масла выполняется по методу Стокса.

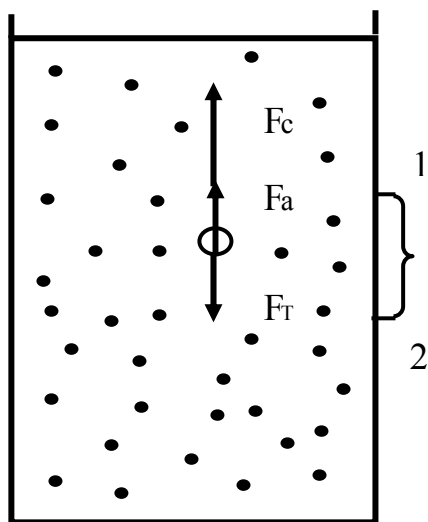


Рисунок 3

Идея метода основывается на формуле Стокса:

$$F_C = 3\pi\eta vd \quad (1)$$

где F_c – сила сопротивления, которую испытывает шарик диаметром d при движении со скоростью v в жидкости с вязкостью η .

Таким образом, измерив F_c , v и d , можно по (1) вычислить η . Но непосредственное измерение F_c затруднительно. Поэтому поступают так. Берут высокий стеклянный цилиндр с закрытым дном и наливают в него исследуемую жидкость. Затем в жидкость опускают шарик. На падающий в жидкости шарик действуют силы (смотри рисунок 3):

$$F_C = 3\pi\eta vd ;$$

выталкивающая сила (сила Архимеда) $F_A = \frac{1}{6} \pi \rho_1 g d^3$;

сила тяжести: $F_T = mg = \frac{1}{6} \pi \rho_2 g d^3$.

где ρ_1 - плотность жидкости, ρ_2 - плотность шарика.

По-второму закону Ньютона результирующая сила (геометрическая сумма всех сил), действующая на шарик, равна произведению массы шарика на ускорение $\dot{a}$:

$$\begin{aligned} \dot{F}_T + \dot{F}_A + \dot{F}_C &= m \dot{a} \text{ в векторной записи,} \\ F_T - F_A - F_C &= ma \text{ в скалярной записи.} \end{aligned}$$

Сначала шарик будет падать ускоренно. Но когда скорость возрастет до величины v , при которой

$$F_C = F_T - F_A \quad (2)$$

ускорение исчезнет. С этого момента шарик будет падать равномерно. Подставив в (2) вместо F_C, F_T, F_A их выражения, получим уравнение

$$3\pi\eta v d = \frac{1}{6} \pi \rho_2 g d^3 - \frac{1}{6} \pi \rho_1 g d^3.$$

Найдем из этого уравнения η :

$$\eta = \frac{g}{18} (\rho_2 - \rho_1) \frac{d^2}{v}. \quad (3)$$

Для измерения скорости v поступают так. На участке равномерного падения шарика наносят две метки 1 и 2, измеряют расстояние l между этими метками. Затем по секундомеру находят время t , за которое шарик проходит это расстояние. Из этих измерений находят скорость равномерного спуска шарика:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Затем значение скорости, равное $\frac{l}{t}$, подставляют в (3) и вычисляют η по формуле:

$$\eta = \frac{g}{18l} (\rho_2 - \rho_1) d^2 t. \quad (4)$$

Экспериментальная часть

Для получения более достоверного значения η , вычисленное по (4), необходимо около 10 раз определить время спуска одного и того же шарика. Однако такая возможность в нашей работе отсутствует. Это затруднение обходится введением «усредненного» шарика: вместо одного шарика берется n шариков близкого диаметра. Измеряется диаметр каждого взятого шарика, потом находится средний диаметр $\bar{d}$, как

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i,$$

где d_i - диаметр i -го шарика. Диаметр измеряется микрометром. Результаты измерений заносят в таблицу.

Таблица 1 Измерение среднего диаметра

	1	2	3	4	5	6	7
$d_i \cdot 10^{-3}, \text{м}$							
$\bar{d} = \dots \text{м}, \quad \sigma = \dots \text{м}, \quad \sigma_{np} = \dots \text{м}.$							
$d = \bar{d} \pm \Delta d = \dots \text{м}, \quad \Delta d = \dots \text{м}.$							

В таблицу 2 заносят время t_i , за которое i -ый шарик проходит расстояние l , а так же измеренное значение этого расстояния. Измерение l проводится линейкой. Полученное при этом значение приравнивается $\bar{l}$, а среднеквадратическая ошибка измерения $\sigma(l)$ может быть принята равной $1 \cdot 10^{-3} \text{м}$.

Таблица 2 Измерение эффективного времени

	1	2	3	4	5	6	7
$t_i = \dots, \text{с}$							
$\bar{t} = \dots, \text{с}, \quad \sigma = \dots, \text{с}, \quad \sigma_{np} = \dots, \text{с}$							
$t = \bar{t} \pm \Delta t = \dots, \text{с}, \quad \Delta t = \dots, \text{с}$							
$\bar{l} = \dots, \text{м}, \quad \sigma(l) = 1 \cdot 10^{-3} \text{м}, \quad \Delta l = \dots, \text{м}$							

Плотность глицерина $\rho_1 = 1,20 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$,

плотность свинца шарика $\rho_2 = 11,3 \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$.

Результаты прямых измерений надо обработать согласно правилам, изложенным в водной лабораторной работе.

Замечание: При вычислении стандартной ошибки измерения диаметра «усредненного» шарика можно пренебречь вкладом среднеквадратичной приборной ошибки микрометра, а при вычислении стандартной ошибки измерения, времени опускания шарика можно не учитывать среднеквадратическую приборную ошибку секундомера из-за их малости.

После обработки прямых измерений, используя формулу (4), вычисляют среднее значение вязкости $\bar{\eta}$:

$$\bar{\eta} = \frac{g}{18} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{l} \bar{d}^2 \cdot \bar{t},$$

и ошибку $\Delta\eta$:

$$\Delta\eta = \varepsilon \cdot \bar{\eta},$$

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta l}{\bar{l}}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta d}{\bar{d}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{\bar{t}}\right)^2},$$

где $\Delta l = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Результат записывается в виде

$$\eta = \bar{\eta} \pm \Delta\eta = (\dots \pm \dots), \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Контрольные вопросы

- 1 Что понимается под силой внутреннего трения?
- 2 Поясните механизм возникновения силы вязкости в газах.
- 3 Как отражается близость между молекулами в жидкости на их тепловое движение?
- 4 Почему возникает сила внутреннего трения в жидкости?
- 5 Сформулируйте словесно и запишите в виде формулы закон Ньютона для силы вязкого трения. Поясните физический смысл величин, входящих в аналитическую запись закона.
- 6 Поясните теорию метода, положенного в основу данной работы.
- 7 Расскажите порядок выполнения работы, обработки результатов измерения.

Список использованных источников

- 1 **Савельев, И.В.** Курс общей физики: учебное пособие: в 3 т.-Т.1: Механика. Молекулярная физика / И.В.Савельев. – М.: Наука, 1988. – 496 с.
- 2 **Трофимова, Т.И.** Курс физики : учебное пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – М.: Высш.шк., 2001. – 542 с.