



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике

(молекулярная физика)

Лабораторная работа

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ И ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ МОЛЕКУЛ ЖИДКОСТИ

Лабораторный практикум по общей физике (молекулярная физика)

Измерение вязкости и энергии активации молекул жидкости

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2018, 15 с.

Переработанное описание задачи общего физического практикума физического факультета МГУ

"Изучение зависимости коэффициента вязкости жидкости от температуры" (Булкин П.С. Попова И.И. "Общий физический практикум. Молекулярная физика". Изд. МГУ).

Оглавление

Вязкость жидкости	3
Измерение вязкости жидкостей	7
Эксперимент	9
Экспериментальная установка	9
Подготовка к измерениям	9
Измерения	10
Обработка результатов	11
Контрольные вопросы	13
Литература	14
Справочные данные	15

Цель работы

Измерение зависимости от температуры коэффициента вязкости жидкостей, расчет энергии активации молекул жидкости.

Идея эксперимента

Коэффициент вязкости измеряется по скорости падения шарика в вязкой среде. Энергия активации молекул рассчитывается по измеренной зависимости ее вязкости от температуры согласно активационной теории течения жидкости.

Вязкость жидкости

Механизмы вязкости. Вязкость – свойство текучих сред (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной части относительно другой. Существование вязкости проявляется в наличии сил внутреннего трения – касательных напряжений, возникающих между слоями жидкостей и газов, движущихся относительно друг друга или относительно поверхности твердых тел. Эти силы стремятся уравнять скорости контактирующих слоев среды, при этом часть кинетической энергии слоев переходит в тепло. Возникновение этих сил связано с тем, что

1) из-за теплового движения молекул они перескакивают из одного слоя в другой, перенося с собой средний импульс своего слоя в соседний слой;

2) молекулы увлекаются за счет межмолекулярных сил сцепления между молекулами соседних слоев.

Направление переноса импульса, то есть направление вектора потока плотности импульса \mathbf{J} , перпендикулярно скоростям слоев (рис.1).

Касательные напряжения описываются законом вязкого трения, который был установлен Ньютоном:

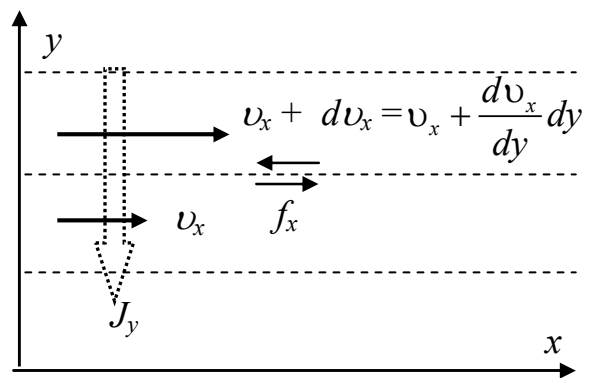


Рис.1 Скорости слоев жидкости, касательные напряжения f_x и поток плотности импульса J

$$f_x = -\eta \frac{dv_x}{dy}.$$

Множитель η называется коэффициентом динамической вязкости среды и в системе СИ измеряется в Па·с. Обратная величина $1/\eta$ называется текучестью. Эти величины зависят от температуры и давления, но по-разному в газах и жидкостях.

В газах молекулы движутся свободно между столкновениями. Перенос импульса между слоями обусловлен первым из указанных механизмов – перелетом молекул из одного слоя в другой, то есть в направлении, поперечным к скорости слоев. С ростом температуры средняя скорость молекул увеличивается, количество молекул, переходящих из одного слоя в другой также возрастает, что приводит к увеличению обмена слоев импульсами, и, следовательно, к росту вязкости. От давления вязкость достаточно разреженных газов не зависит.

Иная ситуация в жидкостях. Характер движения молекул жидкости совсем другой: молекулы связаны силами межмолекулярного взаимодействия друг с другом и не могут свободно перемещаться. Поэтому тепловое движение молекулы сводится в основном к колебаниям внутри потенциальной ямы, созданной ее ближайшим окружением. Но если из-за тепловой флуктуации молекула получает энергию, большую глубины этой ямы, она может совершить скачок в соседнее свободное место, образовавшееся от ухода другой молекулы. Наличие большого количества свободных мест – вакансий – характерная особенность жидкостей, это одна из причин, из-за которой их плотность в большинстве случаев меньше плотности твердого тела. Минимальная энергия, необходимая для скачка молекулы, называется энергией активации, которая далее обозначается как ϵ .

Ориентировочно, при нормальных условиях один скачок в среднем происходит через 10^3 - 10^5 колебаний молекулы.

Так как молекулы жидкости большую часть времени находятся около положений равновесия, то перенос импульса за счет самопроизвольных скачков молекул из слоя в слой, как в газе, очень мал. Движущаяся масса жидкости ув-

лекает соседние слои в основном за счет сил молекулярного сцепления. Текучесть жидкости определяется количеством молекул, получивших энергию, большую энергии активации, достаточную для скачка *в направлении движения* слоев под действием сил сцепления, и концентрацией ближайших вакансий, куда молекула может перескочить. В первом приближении обе эти величины, согласно распределению Больцмана, должны быть пропорциональны $\exp(-\varepsilon / kT)$, то есть текучесть увеличивается с ростом температуры. Отсюда следует, что вязкость должна быть пропорциональна $\exp(\varepsilon / kT)$, то есть уменьшаться с ростом температуры.

Увеличение же давления увеличивает энергию активации и уменьшает концентрацию вакансий, поэтому при больших давлениях вязкость жидкостей возрастает.

Эмпирическая зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры впервые была получена в работах [5-7], и теоретически обоснована на основе вакансионной модели жидкости [8] (1926 г.), которая дает формулу:

$$\eta = C \cdot e^{\varepsilon/kT} \quad (9)$$

где k – постоянная Больцмана, T – температура, C – слабо зависящий от температуры множитель, который можно считать постоянным. Из этой формулы следует простой способ измерения энергии активации. Нужно экспериментально измерить зависимость $\eta(T)$. График $\ln \eta$ от обратной температуры T^{-1} должен быть прямой линией:

$$\ln \eta = \text{const} + \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{1}{T} \right) = A \left(\frac{1}{T} \right) + B.$$

Коэффициент наклона A данной прямой позволяет найти энергию активации

$$\varepsilon = kA. \quad (10)$$

На полное освобождение молекулы жидкости от всех связей необходимо затратить теплоту испарения. На разрушение порядка расположения атомов в твердом теле нужна теплота плавления. Значение энергии активации лежит между этими величинами.

С ростом температуры вязкость жидкости уменьшается, а у ее пара – растет. При критической температуре коэффициенты вязкости жидкости и пара становятся одинаковыми (рис.2).

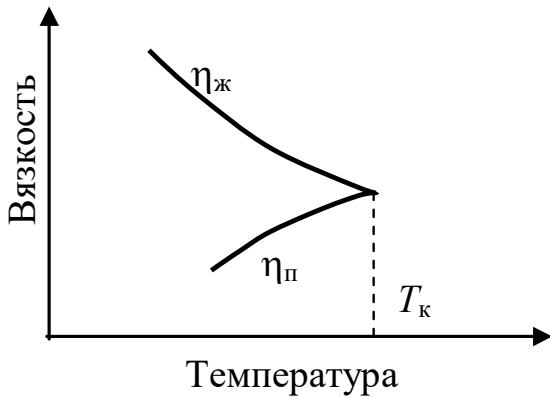


Рис.2 Температурная зависимость коэффициентов вязкости жидкости $\eta_{ж}$ и ее пара $\eta_{п}$.

Другой подход к нахождению коэффициента вязкости был предложен Бачинским [9] (1913 г.). Коэффициент вязкости определяется силами межмолекулярного взаимодействия, которые зависят от среднего расстояния между молекулами, а это расстояние связано с молярным объемом вещества V_m , который, в свою очередь, зависит от температуры

$$V_m = \mu / \rho(T),$$

где μ – молярная масса, ρ – плотность). Поэтому коэффициент вязкости должен зависеть от температуры через V_m . Эксперименты показали, что для многих жидкостей хорошо выполняется соотношение

$$\eta = \frac{c}{V_m - b} = \frac{c}{\mu / \rho - b},$$

где c и b – некоторые эмпирические константы. Это эмпирическое выражение называется формулой Бачинского. Из (11) следует, что график $1/\eta$ (т.е. текучести) от молярного объема должен быть линейным

$$\frac{c}{\eta} = V_m - b \tag{11}$$

или, иначе говоря, линейно зависеть от обратной плотности

$$\frac{1}{\eta} = \frac{\mu}{c} \left(\frac{1}{\rho} \right) - \frac{b}{c}. \tag{12}$$

Чтобы найти эмпирические константы c и b , требуется измерить температурные зависимости вязкости и плотности жидкости. Коэффициент b в данных формулах близок к одноименному параметру уравнения Ван-дер-Ваальса (6).

Формула Бачинского хорошо описывает многие простые жидкости, но, к сожалению, она непригодна для большого класса жидкостей, в которых имеет место ассоциация молекул, к которым относятся вода, полимеры, спирты (в том числе, глицерин), органические кислоты, некоторые хлорпроизводные (например, хлористый этил), ртуть и многие другие.

Эта способность к ассоциации зависит от условий, прежде всего от температуры и давления. Поэтому величины a и b , которые отражают характер межмолекулярных сил, тоже зависят от p и T .

Измерение вязкости жидкостей

Одним из распространенных стандартных способов измерения вязкости жидкостей является метод Гепплера (Hörppler, 1933 г.), основанный на измерении времени падения шарика в исследуемой жидкости. Как известно из механики, при небольших скоростях, при ламинарном обтекании тел жидкостью или газом сила вязкого трения прямо пропорциональна скорости v и коэффициенту вязкости

$$F_{\text{тр}} = -\alpha\eta v,$$

где коэффициент α зависит от формы и размера тела (при больших скоростях обтекание становится турбулентным и эта формула перестает выполняться). Например, для шара радиуса R , движущегося в бесконечной среде, этот коэффициент равен $\alpha = 6\pi R$.

Запишем второй закон Ньютона для падения тела в вязкой среде с учетом выталкивающей силы Архимеда

$$m \frac{dv}{dt} = g(\rho_1 - \rho_2)V - \alpha\eta v,$$

где ρ_1 – плотность тела, ρ_2 – плотность жидкости, v – скорость, g – ускорение свободного падения. Обозначим для краткости через F сумму сил тяжести и Архимеда $F = g(\rho_1 - \rho_2)V$. Чтобы найти скорость, проинтегрируем это уравнение, учитывая, что начальная скорость равна нулю:

$$m \int_0^v \frac{dv}{F - \alpha \eta v} = \int_0^t dt.$$

После интегрирования получим

$$\ln(F - \alpha \eta v)_0^v = -\frac{\alpha \eta}{m} t$$

или

$$\ln\left(1 - \frac{v m}{\tau F}\right) = -\frac{1}{\tau} t,$$

где введен параметр $\tau = m / \alpha \eta$, имеющий размерность времени. Найдем скорость из этого соотношения:

$$v = \frac{F}{m} \tau (1 - e^{-t/\tau}).$$

Сразу после начала падения ($t \ll \tau$) сила вязкости очень мала, и тело будет иметь ускорение F/m , но уже через время порядка $(3-4)\tau$ ускорение станет близким к нулю и тело приобретет окончательную стационарную скорость

$$v_{\text{ст}} = \frac{F \tau}{m} = \frac{F}{\alpha \eta}.$$

Время прохождения телом фиксированного расстояния H с этой скоростью будет равно $t = \frac{H}{v_{\text{ст}}} = \frac{H \alpha}{F} \eta$, откуда следует

$$\eta = \frac{F}{H \alpha} t = \frac{g(\rho_1 - \rho_2)V}{H \alpha} t = K(\rho_1 - \rho_2)t, \quad (13)$$

где в коэффициент K включены только постоянные параметры самой измерительной установки $K = \frac{g}{H \alpha}$. Отметим, что поскольку в установке шарик падает не в безграничной среде, а в узкой трубке, вязкое трение будет больше из-за близости стенок к шарiku, поэтому $\alpha > 6\pi R$. Коэффициент K обычно определяют экспериментально при калибровке установки на жидкости с известной вязкостью.

Эксперимент

Экспериментальная установка

В состав установки входят термостат и прибор для измерения вязкости (вискозиметр). Принципиальная схема вискозиметра показана на рис.3. Исследуемая жидкость помещается в запаянную трубку 1, в которой находится металлический шарик 2, диаметр которого близок к диаметру трубки. Для определения вязкости жидкости необходимо измерить время движения шарика между двумя метками, нанесенными на трубку, – M1 и M2. Согласно (13), время прохождения шариком t расстояния между метками пропорционально коэффициенту вязкости

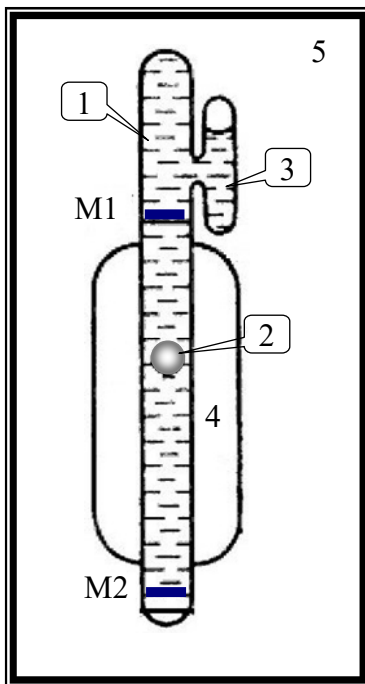


Рис.3.
Схема вискозиметра

$$\eta = B \cdot t. \quad (14)$$

Коэффициент пропорциональности B зависит от плотности материала шарика и самой жидкости. Он найден при градуировке прибора и указан на установке.

На трубке находится также отросток 3, в котором собирается остаточный воздух, выделяющийся из жидкости в процессе работы. Трубка окружена стеклянным сосудом 4, по которому циркулирует теплоноситель (вода) от термостата. Температура воды измеряется на термостате.

Трубка закреплена на панели 5, которая может поворачиваться на 180° вокруг горизонтальной оси.

Подготовка к измерениям

Установка полностью собрана и готова к работе.

Включите термостат и насос термостата. Нагреватели пока не включать. Подождите 3 минуты для установления стабильной циркуляции воды и стационарной температуры во всей системе. Измерьте и запишите температуру воды по термометру на термостате.

Визуально убедитесь, что в трубке нет пузырька воздуха, который помешает движению шарика. Если он есть, загоните его в отросток 3, осторожно поворачивая панель с трубкой.

Перед началом работы нужно проверить, чтобы гибкие водяные шланги, идущие к поворотной панели вискозиметра, не были перекручены. Если необходимо, поверните блок так, чтобы это обеспечить.

Измерения

1. Подготовьте к измерению секундомер, сбросив его предыдущее показание.
2. Поверните измерительный блок, чтобы конец трубки с шариком оказался вверх. Когда шарик, опускаясь, пересечет своей нижней частью верхнюю риску M1, включите секундомер и остановите его, когда шарик подойдет к нижней риске M2. Результат запишите в таблицу 1.

Точность измерений во многом зависит от точности фиксации момента пересечения нижней частью шарика плоскости рисок. Чтобы убрать

Табл. 1.
Время падения шарика в зависимости от температуры жидкости

$T, ^\circ\text{C}$	t_1, c	t_2, c	t_3, c	\bar{t}, c	$S_{\bar{t}}$	η мПа·с	σ_η мПа·с
20							
25							
60							

ошибки, связанные с неправильным углом зрения, риски сделаны кольцевыми. При измерениях глаз нужно располагать в плоскости кольцевой риски так, чтобы ее передняя и противоположная части сливались для глаза в одну линию.

Когда шарик опустится до конца, переверните измерительный блок (в **обратном направлении, чтобы не перекрутились шланги**), и повторно измерьте время прохождения шариком того же пути.

Если время движения шарика большое (больше 3 минут), то для получения достаточной точности можно ограничиться этими двумя измерениями, при этом погрешность измерений будет равна погрешности секундомера. В дальнейшем, когда при нагреве жидкости время падения шарика уменьшится, надо выполнять не менее трех измерений, чтобы уменьшить случайные ошибки, возникающие за счет погрешностей ручного включения / выключения секундомера и визуальной фиксации начала/конца пути шарика. Результаты запишите в табл. 1.

Температурные измерения

3. Цикл измерений проводим только в сторону повышения температуры, добавляя каждый раз приблизительно по 5°C от начальной (комнатной) температуры до 60°C : например, 20, 25, 30°C и т.д.
4. Включите нагреватель термостата и установите на контактном термометре следующую температуру (на 5 К выше). Контролируя рост температуры по термометру, подождите 4-5 минут до ее стабилизации. При достижении новой температуры сигнальные лампочки нагревателей погаснут.
5. Повторите измерения вязкости для новой температуры по пунктам 1, 2.
6. Повторяйте измерения по пунктам 1-5 до достижения максимальной температуры 60°C .

После окончания измерений выключите питание термостата.

Обработка результатов

Нахождение коэффициента вязкости

- 1) Для каждой температуры рассчитайте и запишите в табл.1 средние значения времени падения шарика \bar{t} и стандартные погрешности среднего S_t .
- 2) Заполните столбец значений плотности $\rho(T)$ исследуемой жидкости при всех температурах. Ниже в справочных данных приведена таблица $\rho(T)$ только для воды. Для других жидкостей известен коэффициент изобарного объемного расширения β . Для них рассчитайте плотность по приближенной формуле

Табл. 2

Расчет коэффициента вязкости и энергии активации

$T, ^\circ\text{C}$	ρ г/см ³	η , мПа·с	$S_{\bar{\eta}}$ мПа·с	$y = \ln\eta$	S_y	T^{-1} К ⁻¹	$1/\eta$ мПа ⁻¹ ·с ⁻¹	$1/\rho$ см ³ /г
20								
25								
60								

$$\rho(T) = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}, \quad (15)$$

где ρ_0 – значение плотности при температуре T_0 (значения ρ_0 , T_0 и β для используемых жидкостей приведены там же).

- 3) Для каждой температуры рассчитайте по формуле (14) коэффициент вязкости η и его погрешность

$$\eta = B \cdot \bar{t}, \quad \sigma_{\eta} = B \cdot S_{\bar{t}}$$

Значения коэффициента B приведены на установке.

Нахождение энергии активации

- 4) Рассчитайте в табл.2 столбцы значений $\ln \eta$ и T^{-1} (в кельвинах⁻¹) и постройте график $\ln \eta (T^{-1})$. Аппроксимируйте экспериментальные точки прямой линией, используя МНК, и найдите коэффициент наклона данной прямой A (с погрешностью). Далее рассчитайте энергию активации $\varepsilon = kA$ и ее погрешность S_{ε} (k – постоянная Больцмана).

Проверка формулы Бачинского

- 5) Рассчитайте и запишите в табл.2 для каждой температуры величины $1/\rho$ и $1/\eta$, используя полученные выше данные.
- 6) Постройте график $1/\eta$ как функцию от $1/\rho$. Объясните полученный результат.
- 7) Если полученный график близок к линейному, с помощью МНК аппроксимируйте его линейной зависимостью $1/\eta = A \cdot (1/\rho) + B$ и определите величину коэффициента b в соотношении (12)

$$b = \mu \frac{A}{B}.$$

Сравните это значение b со справочным значением для исследованной жидкости. Величина параметра Ван-дер-Ваальса b для воды приведена в конце описания.

Основные итоги работы

В результате выполнения задачи должны быть измерены зависимости от температуры коэффициент вязкости исследуемой жидкости, рассчитаны энергия активации молекул жидкости и проверена применимость формулы Бачинского к данной жидкости. Сформулируйте выводы по итогам работы.

Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость и коэффициент динамической вязкости? Какова его размерность в системе СИ?
2. Напишите уравнение переноса, в которое входит коэффициент вязкости. Какая величина является объектом переноса?
3. Почему вязкость жидкостей уменьшается с ростом температуры, а у газов – растет?
4. Какой механизм перемещения молекул жидкости? Что такое энергия активации?
5. Как зависит коэффициент вязкости жидкости от температуры и энергии активации?
6. Как меняется вязкость жидкости и пара при приближении к критической точке?
7. К каким жидкостям неприменима формула Бачинского?
8. На чем основан принцип работы вискозиметра с падающим шариком? Выведите закон его движения.
9. Оцените диапазон значений, в котором должна лежать величина энергии активации для воды. Для оценки использовать справочные данные воды, приведенные в конце описания.

Литература

Основная

1. Матвеев А.Н. “Молекулярная физика”, М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. §56.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 1. Механика. М.: Физматлит 2006. Глава XII, § 96.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. В 5 томах. Том 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006. Глава VII, § 89.
4. Алешкевич В.А. Курс общей физики. Молекулярная физика. М.: Физматлит", 2016. Лекции 19, 22, 25.

Справочно-историческая

5. Guzman J. de, Anales de la Sociedad Espanola de Fisica y Quimica, 11, 353 (1913).
6. Raman C. V., "A theory of the viscosity of liquids", Nature, 111 532-533 (1923).
7. Andrade E., Enda C. "Viscosity of liquids." Nature, 125, 309-310 (1930).
8. Frenkel J. Z.Phys., 35, 652 (1926). Френкель Я. И. Кинетическая теория жидкостей. Л.: Наука. 1975. С. 221-229.
9. Batschinsky, A., Ztschr. phys. Chem., 84, 643 (1913).

Справочные данные

Раствор глицерина в воде (85%)

при 20°C:

коэффициент объемного расширения

$$\beta = 2.87 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1},$$

плотность $\rho_0 = 1,222 \text{ г/см}^3$.

Вязкость в зависимости от концентрации (20°C):

% вес	75	80	90
η , мПа·с	25,0	62,0	234,6

Масло касторовое

при 20°C:

коэффициент объемного расширения

$$\beta = 7.0 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1},$$

плотность $\rho_0 = 0,96 \text{ г/см}^3$.

Зависимость вязкости от температуры:

°C	20	30	60
η , мПа·с	986	451	74

Вода

Теплота парообразования

2260 кДж/кг

Теплота кристаллизации

330 кДж/кг

Коэффициент вязкости η и параметры Ван-дер-Ваальса a , b при 20°C

η мПа·с	a , Н·м ⁴ /моль ²	b , см ³ /моль
1,002	0,5451	30,410

Таблица 3. Плотность воды

t, °C	ρ , кг/м ³	t, °C	ρ , кг/м ³
0	999,8	62	982,1
0,1	999,8	64	981,1
2	999,9	66	980
4	1000	68	978,9
6	999,9	70	977,8
8	999,9	72	976,6
10	999,7	74	975,4
12	999,5	76	974,2
14	999,2	78	973
16	999	80	971,8
18	998,6	82	970,5
20	998,2	84	969,3
22	997,8	86	967,8
24	997,3	88	966,6
26	996,8	90	965,3
28	996,2	92	963,9
30	995,7	94	962,6
32	995	96	961,2
34	994,4	98	959,8
36	993,7	100	958,4
38	993	105	954,5
40	992,2	110	950,7
42	991,4	115	946,8
44	990,6	120	942,9
46	989,8	125	938,8
48	988,9	130	934,6
50	988	140	925,8
52	987,1	150	916,8
54	986,2	160	907,3
56	985,2	170	897,3
58	984,2	180	886,9
60	983,2	190	876