



Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Физический факультет

Кафедра общей физики

Лабораторный практикум по общей физике

(молекулярная физика)

Лабораторная работа

**ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ,
ВЯЗКОСТИ И ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ
МОЛЕКУЛ ЖИДКОСТИ**



Москва 2019

Лабораторный практикум по общей физике (молекулярная физика)

С.А.Киров, А.Л. Клавсюк, А.М. Салецкий

**Измерение теплоты парообразования, вязкости и энергии активации
молекул жидкости**

Учебное пособие – М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2019, 23 с.

Данная задача является результатом модернизации ранее существовавшей задачи общего физического практикума физического факультета МГУ "Измерение теплоты парообразования и вязкости воды" (П.С. Булкин, В.М. Захарцов, Г.А. Миронова, Т.И. Малова, Н.Г. Ананьева М.: ООП Физ. фак-та МГУ, 2011).

Оглавление

Теоретическое введение	3
Теплота парообразования	3
Вязкость жидкости	5
Измерение вязкости жидкостей	9
Эксперимент	11
Экспериментальная установка	11
Подготовка к измерениям	13
Измерения	13
Обработка результатов	16
Вариант вискозиметра с капилляром	18
Контрольные вопросы	20
Литература	21
Справочные данные	22

Цель работы

Измерение зависимости от температуры давления насыщенных паров, теплоты парообразования воды, вязкости воды и других жидкостей, расчет энергии активации молекул жидкости.

Идея эксперимента

Теплота парообразования рассчитывается по формуле Клапейрона-Клаузиуса по измеренной зависимости давления насыщенных паров от температуры. 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.

Теоретическое введение

Теплота парообразования

Зависимость давления насыщенных паров жидкости p_n от температуры T определяется соотношением Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dp_n}{dT} = \frac{Q}{T(V_n - V_j)}, \quad (1)$$

где V_n и V_j – молярные объемы пара и жидкости соответственно, Q – молярная теплота парообразования при температуре T . При комнатных условиях $V_n \gg V_j$ (для воды при 20°C $V_n / V_j \sim 10^4$). Поэтому можно записать приближенное соотношение

$$\frac{dp_n}{dT} \approx \frac{Q}{TV_n}. \quad (2)$$

Если температура системы жидкость-пар далека от критической, то для определения молярного объема насыщенного пара можно воспользоваться уравнением состояния идеального газа

$$pV_n = RT. \quad (3)$$

Из уравнений (2) и (3) следует уравнение

$$\frac{dp_n}{dT} \approx \frac{pQ}{RT^2}. \quad (4)$$

Решая его, получаем

$$\ln p = -\frac{Q}{RT} + \text{const.} \quad (5)$$

При решении уравнения (4) принималось, что $Q = \text{const}$, т.е. не учитывалась реальная зависимость $Q(T)$. Это правомерно лишь для узкого интервала температур, для которого Q является средней величиной. В настоящей задаче Q определяется в диапазоне от 20 до 60 °С. Таким образом, получаемое значение Q является усредненным для этого интервала температур.

Из формулы (5) следует, что коэффициент наклона A графика $\ln p = A \cdot (1/T) + B$ равен $-Q/R$. Определив его, можно рассчитать молярную теплоту парообразования

$$Q = |A|R.$$

Величина Q складывается из двух частей. Первая часть – это энергия, которая тратится на работу расширения пара, образующегося из жидкости, против сил внешнего давления p :

$$Q_1 = p(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}).$$

Она называется внешней теплотой парообразования.

Другая часть теплоты парообразования тратится на преодоление сил притяжения между молекулами жидкости. Эта часть называется внутренней теплотой парообразования. Она равна разности внутренних энергий моля пара и жидкости. В рамках модели реального газа Ван-дер-Ваальса молярная внутренняя энергия, как пара, так и жидкости дается формулой $U = -\frac{a}{V_m}$, где a – постоянная в уравнении Ван-дер-Ваальса

в уравнении Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT. \quad (6)$$

Поэтому при изотермическом испарении внутренняя теплота парообразования для 1 моля равна

$$Q_2 = a\left(\frac{1}{V_{\text{ж}}} - \frac{1}{V_{\text{п}}}\right).$$

Полная теплота парообразования 1 моля жидкости выражается формулой

$$Q = Q_1 + Q_2 = p(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}) + a\left(\frac{1}{V_{\text{ж}}} - \frac{1}{V_{\text{п}}}\right).$$

Вдали от критической точки величина молярного объема $V_{\text{п}} \gg V_{\text{ж}}$, поэтому можно приближенно записать

$$Q \approx pV_{\text{п}} + \frac{a}{V_{\text{ж}}}. \quad (7)$$

С ростом температуры Q убывает, обращаясь в нуль при критической температуре. Однако в небольшом интервале температур можно считать Q приблизительно постоянной.

Измерив Q , можно из соотношения (7) найти величину параметра a . Если пользоваться найденной удельной молярной теплотой парообразования $q = Q/\mu$ и удельными объемами пара и жидкости $v = V/\mu$, то из (7) следует

$$a = \mu^2(q - pv_{\text{п}})v_{\text{ж}}. \quad (8)$$

где μ – молярная масса.

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

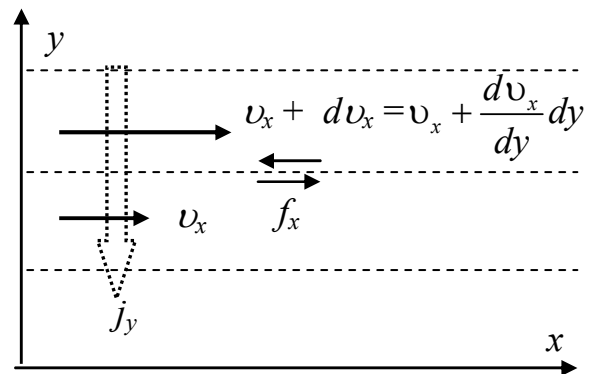


Рис.1 Скорости слоев жидкости, касательные напряжения f_x и поток плотности импульса j

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:

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

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 увлекает соседние слои в основном за счет сил молекулярного сцепления. Текучесть жидкости определяется количеством молекул, имеющих энергию, 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 [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).

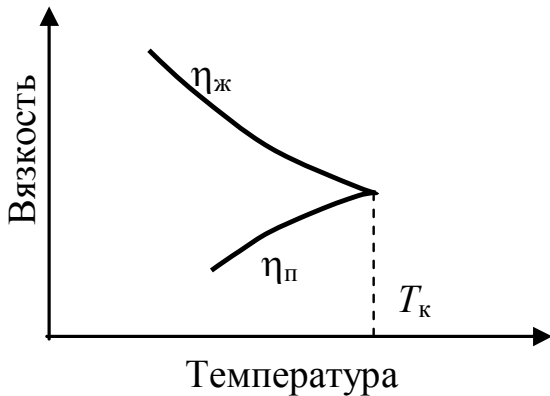


Рис.2 Температурная зависимость коэффициентов вязкости жидкости $\eta_{ж}$ и ее пара $\eta_{п}$.

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

$$\eta = \frac{c}{V_m - b} = \frac{c}{\frac{\mu}{\rho} - b}, \quad (11)$$

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

$$\frac{c}{\eta} = V_m - b \quad (11)$$

или

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

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).

Таким образом, комплекс характеристик $p(T)$, $\eta(T)$ и $V(T)$ дает в принципе возможность найти величины Q , ε , a , b , а следовательно, и критические величины вещества.

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 (Hörpler, 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 вяз-

КОСТЬЮ.

Эксперимент

Экспериментальная установка

Общий вид установки показан на рис.3. В состав установки входят жидкостный (водяной) термостат 1, прибор для измерения давления насыщенных паров 2 и прибор для измерения вязкости (вискозиметр) 3.

Прибор для измерения давления насыщенных паров воды. Принципиальная схема прибора показана на рис.4. Он состоит из герметичной вертикальной трубки 1, из которой откачан воздух. На ее дне налита вода 2, находящаяся в равновесии с паром. Манометр в виде U-образной трубки 3 с ртутью 4 соединен с трубкой 1 выше уровня воды, т.е. в области нахождения насыщенного водяного пара. Другое колено манометра откачено. Манометр измеряет давление насыщенных паров воды в мм рт. ст. Отсчет уровней ртути 4 производится по линейке 7.

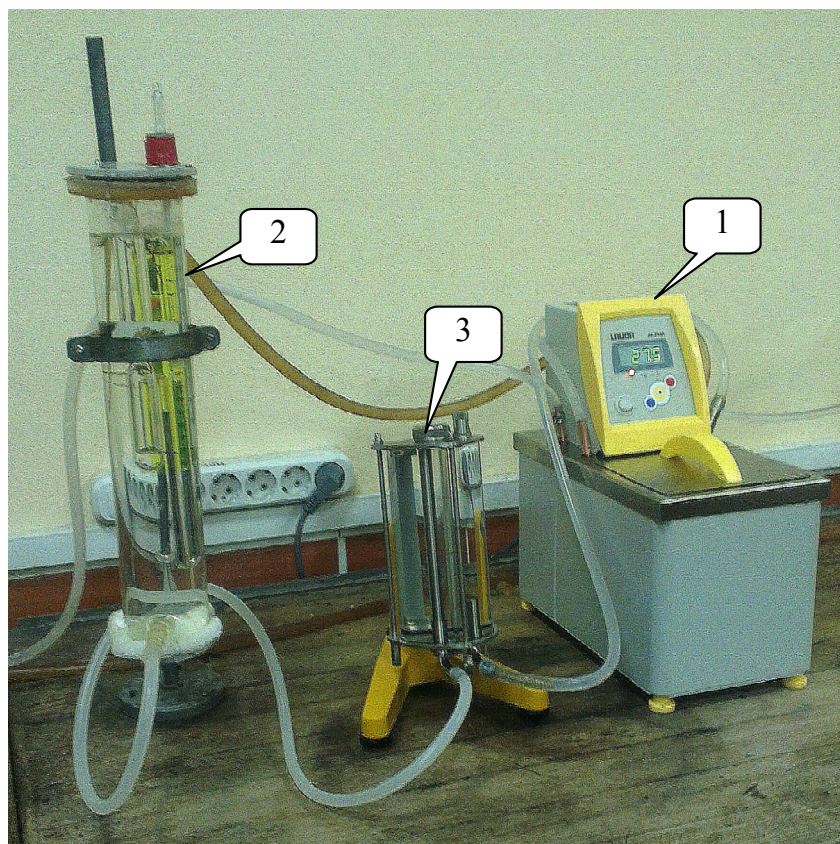


Рис.3 Общий вид экспериментальной установки.

1: термостат, 2: прибор для измерения давления насыщенных паров; 3: вискозиметр

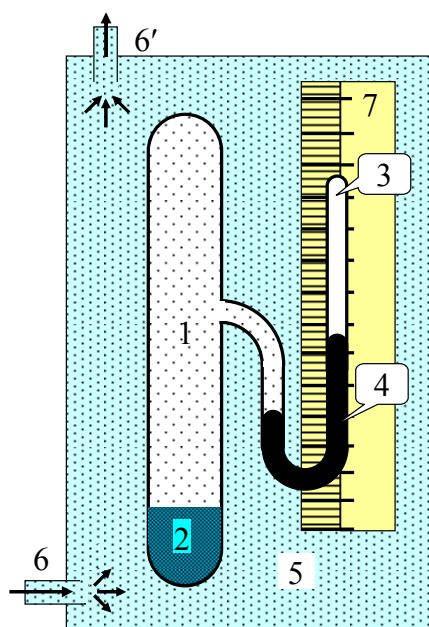


Рис.4. Прибор для измерения давления насыщенных паров воды

Вся система помещается в сосуд с водой 5. Температура воды задается с помощью термостата, который осуществляет циркуляцию воды в сосуде через входной и выходной патрубки 6 и 6'.

Вискозиметр. В задаче используется промышленный аппарат для измерения вязкости жидкостей HÖPPLER® KF 3.2 фирмы RHEOTEST Messgeräte Medingen GmbH, Германия. Его общий вид и разрез показаны на рис.5. Исследуемая жидкость заливается в прозрачную трубку 1 с шариком 2 внутри, герметично закрываемую с обеих сторон завинчивающимися пробками. На трубке нанесены три кольцеобразных риски. Крайние риски ограничивают фиксированное расстояние. Время, за которое шарик его проходит, измеряется секундомером. Средняя риска находится посередине и может использоваться при измерениях, если из-за большой вязкости время движения шарика на полном расстоянии слишком велико.

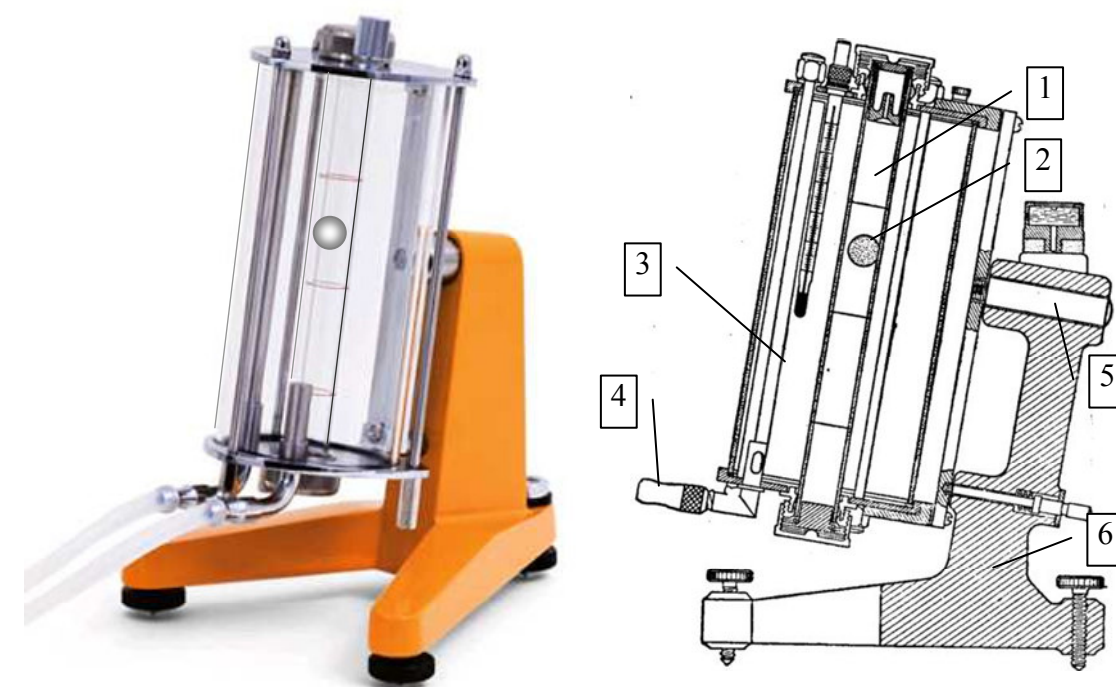


Рис.5 Вискозиметр.

Трубка находится внутри прозрачного цилиндрического кожуха 3, по которому циркулирует жидкий теплоноситель (вода), поступающая через патрубки 4 от термостата по гибким трубкам. Весь блок с измерительной трубкой может вращаться на 360° вокруг оси 5, связанной с подставкой 6. Установка комплектуется набором шариков разной массы, плотности и радиуса, позволяющих проводить измерения на жидкостях в широком диапазоне вязкостей в диапазоне (0,6 - 70000) мПа·с.

Подготовка к измерениям

Установка полностью готова к работе. Измерение давления насыщенного пара на всех установках проводится только для воды.

Жидкости, на которых измеряется вязкость, постоянно залиты в вискозиметры. Их название и состав (вода, 85% раствор глицерина, масло касторовое) указаны



на установках. Размер и плотность измерительных шариков в вискозиметрах подобраны оптимальным образом. Перед началом работы нужно проверить, чтобы гибкие водяные шланги, идущие к поворотному блоку вискозиметра, не были перекручены. Если необходимо, поверните блок так, чтобы это обеспечить. Пример неправильного обращения с вискозиметром приведен на рисунке слева (реальный случай при работе студента).

Измерения

Модуль измерения давления паров и вискозиметр подключены последовательно к одному термостату. Поэтому температурная зависимость давления насыщенных паров и вязкости производится параллельно по мере повышения температуры воды в термостате. Измерения проводятся от комнатной температуры до 60°C .

Табл. 1.
Измерение давления насыщенного пара

$T, ^\circ\text{C}$	$h_1, \text{мм}$	$h_2, \text{мм}$	p мм. рт.ст.	σ_p мм. рт.ст.	$\ln p$	$1/T$ K^{-1}
20?						
25						
30						
60						

1) Запишите начальную температуру, измеренную по термометру, находящемуся в водяной рубашке блока измерения давления пара.

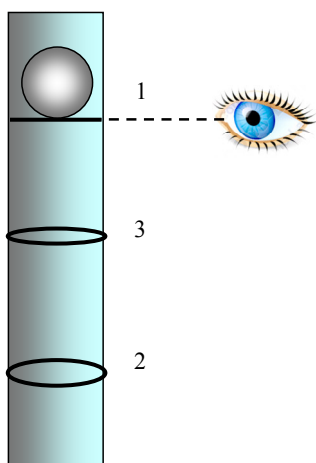
Измерение давления насыщенных паров

2) Измерьте по линейке (см. рис.4) и запишите в табл.1 координаты уровней h_1 и h_2 ртутного столба в обоих коленах манометра.

Измерение вязкости

3) Подготовьте к измерению секундомер, сбросив его предыдущее показание.

а) Поверните измерительный блок, чтобы конец трубки с шариком оказался вверх. Когда шарик, опускаясь, пересечет своей нижней частью верхнюю риску, включите секундомер и остановите его, когда шарик подойдет к нижней



риске. Результат запишите в таблицу 2.

Точность измерений во многом зависит от точности фиксации момента пересечения нижней частью шарика плоскости рисок. Чтобы убрать 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 (рис.6).

Рис.6. Измерительная трубка.
Расположение меток 1-3 и правильное положение глаза при измерениях

б) Когда шарик опустится до конца, провер-

ните измерительный блок (в **обратном направлении, чтобы не перекрутить 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 измерением времени опускания до центральной метки, умножив затем результат на 2, при этом хватит и двух измерений. В дальнейшем, когда при нагреве жидкости время падения шарика уменьшится, надо использовать всю рабочую длину трубки и 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. 2.

Температурные измерения

4) Включите термостат, нажав левую белую клавишу 1 на его пульте (рис.7).

Включится насос и начнется циркуляция воды. На дисплее появится индикация начальной (комнатной) температуры воды в резервуаре термостата. Цикл измерений проводим только в сторону повышения температуры, добавляя каждый раз по 5°C от начальной (комнатной) температуры до 60°C: 20, 25, 30°C и т.д. Для случая воды другие температуры лучше не выставлять, поскольку нужные для расчетов значения ее плотности приведены ниже только для этого ряда температур.



Рис.7 Пульт управления термостатом

5) Войдите в режим выставления нужной температуры, нажав центральную желтую кнопку 2. После появления на экране надписи SET, нажмите кнопку еще раз. На дисплее появится мигающая индикация ранее выставленной температуры, которую можно увеличить нажатием красной верхней кнопки 3, или, при необходимости, уменьшить с помощью нижней синей кнопки 4. После

Табл. 2.

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							

появления на индикаторе нужной цифры, выйдите из режима выставления температуры, снова нажав центральную желтую кнопку 2. Дисплей будет показывать текущую температуру воды, постепенно возрастающую до установленного значения.

Когда дисплей покажет, что выставленная температура достигнута, ждем еще 2-3 минуты для установления теплового равновесия в измерительных блоках. Признаком равновесия в системе пар-жидкость является остановка перемещений уровней ртути в манометре.

- б) Проведите измерения давления пара и вязкости согласно пунктам 2) и 3).
- 7) Повторяйте измерения по пунктам 5), 2) и 3) до достижения максимальной температуры 60°C.

После окончания измерений выключите питание термостата левой клавишей 1.

Обработка результатов

Давление насыщенного пара

- 1) Для каждой температуры рассчитайте и запишите в табл.1 давление насыщенного пара в мм рт. ст. $p = h_1 - h_2$, логарифм этой величины $\ln p$ и величину $1/T$.
- 2) Постройте график зависимости $\ln p$ от $1/T$. Поскольку наклон графика $\ln p$ не зависит от единиц измерения p , переводить эту величину, измеренную в единицах мм рт. ст., в паскалы, не обязательно. С помощью МНК аппроксимируйте график линейной зависимостью $\ln p = A \cdot (1/T) + B$.

- 3) Рассчитайте молярную теплоту парообразования $Q = AR$ и ее погрешность σ_Q . Найдите также удельную теплоту парообразования $q = Q / \mu$. По формуле (8) рассчитайте величину параметра a для воды и сравните со справочным значением. При расчете используйте данные по удельным объемам воды и пара, приведенные в конце описания.
- 4) Для отчета по задаче постройте также исходный график $p(T)$, также в единицах мм рт. ст.

Вязкость и энергия активации жидкости

Нахождение коэффициента вязкости

- 5) Для каждой температуры рассчитайте и запишите в табл.2 средние значения времени падения шарика \bar{t} и стандартные погрешности среднего S_t .
- 6) Заполните столбец значений плотности $\rho_2(T)$ исследуемой жидкости при всех температурах. Ниже в справочных данных приведена таблица $\rho_2(T)$ только для воды. Для других жидкостей известен коэффициент изобарного объемного расширения β . Для них рассчитайте плотность по формуле

$$\rho_2(T) = \frac{\rho_0}{1 + \beta(T - T_0)}, \quad (14)$$

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

- 7) Для каждой температуры рассчитайте по формуле (13) коэффициент вязкости η и его погрешность

$$\eta = K(\rho_1 - \rho_2)\bar{t}.$$

где ρ_1 – известная плотность материала шарика. Значения приборного коэффициента K и плотности материала шарика ρ_1 приведены на каждой установке и в конце описания.

Нахождение энергии активации

- 8) Рассчитайте в табл.3 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

Табл. 3

Расчет коэффициента вязкости и энергии активации

$T, ^\circ\text{C}$	ρ_2 г/см ³	$\eta,$ мПа·с	$S_{\bar{\eta}}$ мПа·с	$y = \ln\eta,$	S_y	T^{-1} К ⁻¹	$1/\eta$ мПа ⁻¹ ·с ⁻¹	$1/\rho_2$ см ³ /г
20								
25								
60								

прямой A (с погрешностью). Далее рассчитайте энергию активации $\varepsilon = kA$ и ее погрешность S_ε (k – постоянная Больцмана).

Проверка формулы Бачинского

- 9) Рассчитайте и запишите в табл.3 для каждой температуры величины $1/\rho_2$ и $1/\eta$, используя полученные выше данные.
- 10) Постройте график $1/\eta$ как функцию от $1/\rho_2$. Объясните полученный результат.
- 11) Если полученный график близок к линейному, с помощью МНК аппроксимируйте его линейной зависимостью $1/\eta = A \cdot (1/\rho_2) + B$ и определите величину коэффициента b и c в соотношении (12)

$$c = \frac{A}{\mu}, \quad b = -\mu \frac{B}{A}.$$

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

Вариант вискозиметра с капилляром

Одна из экспериментальных установок этой задачи имеет вискозиметр капиллярного типа, на котором и выполняется измерение вязкости воды.

В таком приборе измеряется время протекания известного объема исследуемой жидкости через капиллярную трубку (рис.8). Устройство имеет вертикальный

капилляр C , присоединенный на верхнем конце к резервуару P известного объема V . На резервуаре нанесены две риски. Резервуар P заполняется исследуемой жидкостью, затем измеряется время, в течение которого он опорожняется, т.е. уровень жидкости под действием силы тяжести опустится от верхней риски до нижней.

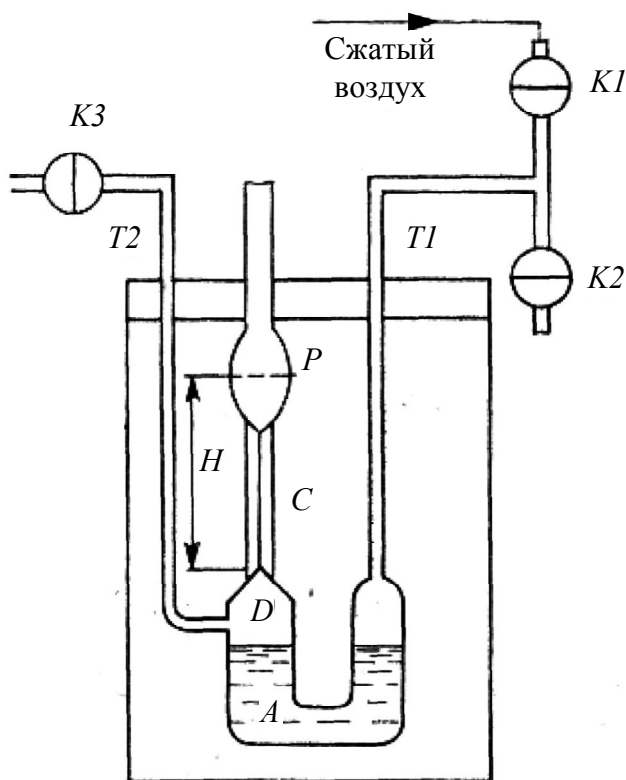


Рис.8. Капиллярный вискозиметр

Согласно формуле Пуазейля, в условиях стационарного ламинарного потока объем V жидкости, протекающий за время t через капиллярную трубку радиуса R и длиной l , определяется выражением:

$$\frac{V}{t} = \frac{\pi R^4}{8l\eta} \Delta p,$$

где Δp – разность давлений между концами трубки. Разность давлений Δp , заставляющая течь жидкость, определяется высотой ее столба. Положение его верхнего уровня здесь немного меняется по мере вытекания жидкости.

Чтобы это учесть, для расчета Δp берется среднее значение высоты H от нижнего конца капилляра до середины резервуара P , как показано на рис.8.

Из формулы Пуазейля следует, что вязкость жидкости пропорциональна времени ее вытекания через капилляр

$$\eta = B \cdot t, \tag{15}$$

где $B = \frac{\pi R^4}{8lV} \Delta p = \frac{\pi R^4}{8lV} \rho g H$ – приборный коэффициент, рассчитанный с учетом плотности исследуемой жидкости (воды). В нашей задаче изменение плотности воды при нагреве мало (менее 1%), поэтому этот коэффициент можно считать постоянным. Его величина приведена на установке.

Измерение капиллярным вискозиметром

В исходном положении все краны закрыты.

- 1) Откройте кран $K1$, соединенный с источником сжатого воздуха. Под давлением воздуха жидкость из резервуара A поднимется вверх по капилляру C в объем P . Когда ее уровень поднимется выше верхней риски, закройте кран $K1$.
- 2) Подготовьте секундомер к новому измерению и откройте краны $K2$ и $K3$. В результате на нижнем конце капилляра, в сосуде P и в обоих коленах сосуда A будет постоянное атмосферное давление, и жидкость начнет вытекать через капилляр.
- 3) В момент прохождения уровня жидкости через верхнюю риску включите секундомер и выключите его в момент прохождения нижней риски.
- 4) Рассчитайте коэффициент вязкости по формуле (15).

Основные итоги работы

В результате выполнения задачи должны быть измерены зависимости от температуры давления насыщенных паров воды и вязкость одной из жидкостей, рассчитаны теплота парообразования воды, энергия активации молекул исследованной жидкости и параметры Ван-дер-Ваальса, проверена применимость формулы Бачинского к данной жидкости. Сформулируйте выводы по итогам работы.

Контрольные вопросы

1. Получите уравнение Клапейрона-Клаузиуса.
2. Что такое внутренняя и внешняя теплота парообразования? Какая из этих величин больше при комнатной температуре?
3. Как ведет себя теплота парообразования с ростом температуры (качественно)?
4. Что такое вязкость и коэффициент динамической вязкости?
5. Напишите уравнение переноса, в которое входит коэффициент вязкости. Какая величина является объектом переноса?

6. Почему вязкость жидкостей уменьшается с ростом температуры, а у газов – растёт?
7. Какой механизм перемещения молекул жидкости? Что такое энергия активации?
8. Как зависит коэффициент вязкости жидкости от температуры и энергии активации?
9. К каким жидкостям неприменима формула Бачинского?
10. На чем основан принцип работы вискозиметра с падающим шариком? Выведите закон его движения.
11. На чем основан принцип работы капиллярного вискозиметра? Какие ограничения накладываются на поток жидкости в капилляре вискозиметра?

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).
9. Batschinsky, A., *Ztschr. phys. Chem.*, 84, 643 (1913).

Справочные данные

Глицерин

85% водный раствора глицерина

при 20°C: коэффициент объемного расширения $\beta = 2.87 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$,
плотность $\rho_0 = 1,222 \text{ г/см}^3$.

Раствор глицерина в воде, 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

Удельная теплота парообразования (q), динамическая вязкость (η), параметры Ван-дер-Ваальса (a , b) и давление насыщенного пара ($p_{\text{нас}}$) при 20°C

q кДж/кг	η мПа·с	a , Н·м ⁴ /моль ²	b , см ³ /моль	$p_{\text{нас}}$ кПа
2453	1,002	0,5451	30,410	2.33

Удельный объем $\nu = 1/\rho$ воды и водяного пара при разных температурах

t °C	Удельный объем ν	
	вода л/кг	пар м ³ /кг
20	1.00177	57.8
25	1.00294	43.40
30	1.00435	32.93
35	1.00598	25.25
40	1.00782	19.55
45	1.00985	15.28
50	1.01207	12.054
55	1.01448	9.589
60	1.01705	7.687
65	1.01979	6.209
70	1.02270	5.052

