

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы № 2.5.

**ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ  
КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ  
ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ\***

---

\* Аникин А.И. Свойства газов. Свойства конденсированных систем: лабораторный практикум / А.И. Аникин; Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова. – Архангельск: ИД САФУ, 2014. – 48 с.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.5. ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

### 6.1. Теоретические положения

В газах молекулы не связаны или очень слабо связаны друг с другом силами взаимодействия. Молекулы свободно движутся и в результате соударений разлетаются в разные стороны, поэтому газ занимает весь предоставленный ему объем. Жидкость, как и газ, принимает форму того сосуда, в котором она находится. Однако в жидкостях, в отличие от газов, силы взаимодействия между молекулами удерживают их на определенных расстояниях друг от друга. Поэтому жидкости сохраняют свой объем практически неизменным.

При движении жидкостей (как и газов) между их слоями возникают силы внутреннего трения. Модуль силы внутреннего трения можно найти по закону Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S ,$$

где  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости;  $\frac{dv}{dz}$  – градиент скорости в направлении оси  $z$ , перпендикулярной к поверхности слоя;  $S$  – площадь поверхности слоя.

Коэффициенты вязкости жидкостей существенно больше, чем у газов. При увеличении температуры коэффициенты вязкости жидкостей уменьшаются.

В газах молекулы движутся хаотически. В жидкостях тепловое движение молекул сводится в основном к их колебаниям и скачкообразным переходам из одного места локализации в другое. Такие переходы возможны потому, что в жидкостях имеются свободные места – «дырки», благодаря чему молекулы и могут перемещаться, покидая свое место и занимая одну из соседних «дырок».

На каждую молекулу в жидкости действуют силы притяжения со стороны соседних молекул. Для того чтобы молекула покинула свое место, она должна обладать энергией, достаточной для преодоления силы взаимодействия с ближайшими молекулами. Минимальную энергию, необходимую молекуле для преодоления сил взаимодействия с ближайшими молекулами и скачка в новое положение, называют энергией активации  $\Delta E$  молекул данной жидкости.

Переходы молекул в жидкостях из одного положения в другое происходят сравнительно редко и на малые расстояния порядка  $10^{-10}$  м. Такой характер движения молекул объясняет то, что коэффициенты диффузии в жидкостях существенно меньше, чем в газах, а коэффициенты вязкости, наоборот, больше. Чем больше температура жидкости, тем больше молекул совершают переходы из одного места в другое, тем меньше время нахождения молекулы во временном положении равновесия между очередными скачками.

Сущность явления внутреннего трения в жидкостях состоит в том, что молекулы, находящиеся под действием внешней силы, совершают скачки преимущественно в направлении этой силы. Чем чаще способны молекулы жидкости перемещаться из одного мгновенного положения равновесия в другое, тем меньше вязкость жидкости.

Для большинства жидкостей зависимость динамического коэффициента вязкости  $\eta$  от температуры  $T$  в узком интервале температур можно описать формулой Андраде:

$$\eta = A e^{\frac{B}{T}},$$

где  $A, B$  – константы, зависящие от свойств конкретной жидкости.

Я.И.Френкель связал константу  $B$  с энергией активации молекулярного скачка  $\Delta E$ :

$$\eta = A e^{\frac{\Delta E}{kT}},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

Прологарифмируем это выражение:

$$\ln \eta = \ln A + \frac{\Delta E}{kT}. \quad (6.1)$$

Из формулы (6.1) видно, что зависимость  $\ln \eta = f\left(\frac{1}{T}\right)$  является линейной.

## 6.2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка, схема которой изображена на рис.6.1, состоит из вискозиметра 1, пробирки 2 с исследуемой жидкостью, цилиндрического сосуда 3. Пробирка помещена в воду, температуру которой можно изменять с помощью нагревателя. На капилляре вискозиметра нанесены метки  $m$  и  $n$ , позволяющие определить объем жидкости, проходящей через капилляр.

Если течение жидкости является ламинарным, то динамический коэффициент ее вязкости можно выразить из формулы Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8lV}, \quad (6.2)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $\Delta p$  – перепад давлений на участке капилляра длиной  $l$ ;  $V$  – объем жидкости, прошедшей через капилляр за время  $\tau$ .

Если жидкость опускается вниз по капилляру под действием силы тяжести, то

$$\Delta p = \rho gh,$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – высота столба жидкости.

Подставляя значение  $\Delta p$  в формулу (6.2), получаем

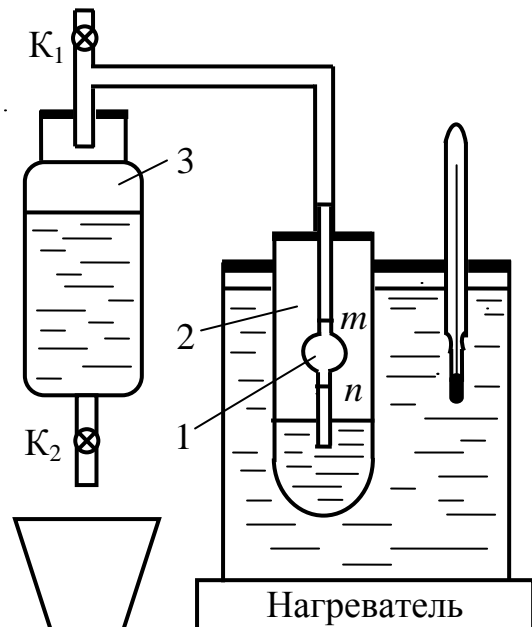


Рис. 6.1. Схема экспериментальной установки

$$\eta = \frac{\pi r^4 \rho g h \tau}{8 l V}.$$

Предварительно опыты проводят с эталонной жидкостью (водой), коэффициенты вязкости которой при различных температурах известны. Опыты с исследуемой жидкостью проводят с тем же капилляром, при тех же значениях  $r$ ,  $h$ ,  $l$ ,  $V$ . В этом случае коэффициент вязкости  $\eta_{\text{ж}}$  исследуемой жидкости можно рассчитать по формуле

$$\eta_{\text{ж}} = \eta_{\text{в}} \frac{\rho_{\text{ж}} \tau_{\text{ж}}}{\rho_{\text{в}} \tau_{\text{в}}}, \quad (6.3)$$

где  $\eta_{\text{в}}$  – динамический коэффициент вязкости воды;  $\rho_{\text{ж}}$ ,  $\rho_{\text{в}}$  – плотности соответственно исследуемой жидкости и воды;  $\tau_{\text{ж}}$ ,  $\tau_{\text{в}}$  – время истечения из капилляра соответственно исследуемой жидкости и воды.

При домашней подготовке к выполнению лабораторной работы следует изучить теоретический материал, изложенный в описании к лабораторной работе № 2.3. Определение коэффициента вязкости воздуха.

### **6.3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений**

6.3.1. Ознакомиться с устройством экспериментальной установки, записать перечень приборов и принадлежностей и их характеристики в отчет о лабораторной работе.

6.3.2. При комнатной температуре заполнить капилляр и шарик вискозиметра исследуемой жидкостью немного выше метки  $m$ . Для этого, закрыв кран  $K_1$ , открыть кран  $K_2$  так, чтобы вода по каплям вытекала из цилиндрического сосуда. После заполнения вискозиметра исследуемой жидкостью закрыть кран  $K_2$ , открыть кран  $K_1$  и измерить с помощью секундомера время истечения жидкости от метки  $m$  до метки  $n$ . Выполнить аналогичные операции, постепенно нагревая воду на  $5^\circ\text{C}$  до  $60^\circ\text{C}$ .

6.3.3. Рассчитать плотность  $\rho_{\text{ж}}$  исследуемой жидкости при всех измеренных значениях температуры  $t$  по формуле

$$\rho_{\text{ж}} = \frac{\rho_{0\text{ж}}}{1 + \beta t},$$

где  $\rho_{0\text{ж}}$  – плотность жидкости при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости (значения  $\rho_{0\text{ж}}$  и  $\beta$  приведены в справочных данных к лабораторной установке).

6.3.4. Вычислить значения динамического коэффициента вязкости  $\eta_{\text{ж}}$  исследуемой жидкости при всех измеренных значениях температуры по формуле (6.3). Значения  $\eta_{\text{в}}$  и  $\rho_{\text{в}}$  при различных температурах приведены в табл.4 приложения, а  $\tau_{\text{в}}$  – в справочных данных к лабораторной установке.

6.3.5. Рассчитать значения  $1/T$  и  $\ln \eta_{\text{ж}}$ . Результаты всех измерений и расчетов записать в табл.6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений и расчетов

Номер опыта	$t$	$T$	$1/T$	$\tau_{\text{ж}}$	$\rho_{\text{ж}}$	$\eta_{\text{ж}}$	$\ln \eta_{\text{ж}}$

6.3.6. Построить график зависимости  $\ln \eta_{\text{ж}} = f\left(\frac{1}{T}\right)$ . На графике выбрать две удаленные точки с координатами соответственно  $\ln \eta_{\text{ж}1}$ ,  $1/T_1$  и  $\ln \eta_{\text{ж}2}$ ,  $1/T_2$ , по координатам этих точек найти значение

$$\frac{\Delta E}{k} = (\ln \eta_{\text{ж}1} - \ln \eta_{\text{ж}2}) \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)^{-1}$$

и затем – значение  $\Delta E$  энергии активации молекул исследуемой жидкости.

## 6.4. Контрольные вопросы

1. Что понимают под внутренним трением? Чем обусловлено внутреннее трение в жидкостях с точки зрения молекулярно-кинетических представлений?

2. В каких единицах Международной системы (СИ) выражают динамический коэффициент вязкости?

3. Как зависит динамический коэффициент вязкости жидкости от ее температуры?

4. Какой режим течения жидкости (газа) называют ламинарным? Турбулентным?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента

Число измерений	Доверительная вероятность $\alpha$				
	0,90	0,95	0,98	0,99	0,999
3	2,9	4,3	7,0	9,9	32
4	2,4	3,2	4,5	5,8	13
5	2,1	2,8	3,7	4,6	8,7
6	2,0	2,6	3,4	4,0	6,9
7	1,9	2,4	3,1	3,7	6,0
8	1,9	2,4	3,0	3,5	5,4
9	1,9	2,3	2,9	3,4	5,0
10	1,8	2,3	2,8	3,3	4,8
11	1,8	2,2	2,8	3,2	4,6
12	1,8	2,2	2,7	3,1	4,5
$\infty$	1,6	2,0	2,3	2,6	3,3

Таблица 2

Значения плотности  $\rho$ , эффективного диаметра  $d$  молекул и динамического коэффициента вязкости  $\eta$  некоторых газов при нормальных условиях

Вещество	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$d \cdot 10^9$ , м	$\eta \cdot 10^5$ , Па·с
Азот	1,25	0,37	1,67
Воздух	1,29	–	1,72
Кислород	1,43	0,35	1,92

Таблица 3

Значения коэффициента диффузии  $D$  паров этанола ( $C_2H_5OH$ ) в воздухе при различных температурах  $t$  и давлении  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па

$t$ , °C	14	16	18	20	22	24	26
$D \cdot 10^5$ , м <sup>2</sup> /с	1,15	1,16	1,18	1,19	1,20	1,22	1,23

Таблица 4

Значения плотности  $\rho$  и динамического коэффициента вязкости  $\eta$  воды при различных температурах  $t$  и давлении  $p = 1,01 \cdot 10^5$  Па

$t, ^\circ\text{C}$	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$\rho, \text{кг/м}^3$	998,2	997,1	995,7	994,1	992,2	990,2	988,1	985,7	983,1	980,5	977,8
$\eta \cdot 10^3, \text{Па}\cdot\text{с}$	1,004	0,894	0,801	0,722	0,653	0,599	0,549	0,506	0,470	0,435	0,406

Таблица 5

Коэффициенты теплопроводности некоторых металлов

Вещество	Алюминий	Латунь	Бронза	Сталь
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	160 – 210	70 – 120	60 – 80	40 – 48

Таблица 6

Коэффициенты теплопроводности некоторых диэлектриков

Вещество	Стекло	Картон	Пенопласт	Текстолит
$\lambda, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,8 – 1,2	0,14 – 0,35	0,04 – 0,05	0,2 – 0,4