

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
ФИЗТЕХ-ШКОЛА ФИЗИКИ И ИССЛЕДОВАНИЙ им. ЛАНДАУ

Лабораторная работа № 2.2.6  
**Определение энергии активации по температурной  
зависимости вязкости жидкости**

Плотникова Анастасия Александровна  
Группа Б02-406

Долгопрудный, 2025 г.

### Цель работы:

- 1) измерение скорости падения шариков при разной температуре жидкости;
- 2) вычисление вязкости жидкости по закону Стокса и расчёт энергии активации.

### В работе используются:

стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью (глицерин);  
мелкие шарики (диаметром порядка 1 мм);  
микроскоп отсчетный МПБ-2 ( $\sigma = 0.1$  мм);  
термостат Julabo;  
секундомер.

## Теоретическая справка

### Энергия активации и температурная зависимость вязкости

В жидкости присутствует ближний, но не дальний порядок.

Для того чтобы перейти в новое состояние, тепловая энергия молекул должна — вследствие флуктуации — увеличиться на некоторую величину  $W$ , называемую *энергией активации*.

Вязкость жидкости экспоненциально зависит от температуры, что описывается формулой Больцмана:

$$\eta \sim Ae^{W/kT}, \quad (1)$$

где  $\eta$  — вязкость,

$W$  — энергия активации,

$k$  — постоянная Больцмана,

$T$  — температура.

Графически зависимость  $\ln \eta$  от  $1/T$  представляет собой прямую линию, угловой коэффициент которой позволяет определить  $W$ :

$$W = -k \frac{d(\ln \eta)}{d(1/T)}. \quad (2)$$

### Закон Стокса

Сила сопротивления, действующая на шарик в вязкой жидкости, выражается через закон Стокса:

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (3)$$

где  $r$  — радиус шарика,

$v$  — его скорость.

При установившемся движении шарика баланс сил записывается как:

$$Vg(\rho - \rho_{\text{ж}}) - 6\pi\eta r v = V\rho \frac{dv}{dt} \quad (4)$$

$$v(t) = v_{\text{уст}} - [v_{\text{уст}} - v(0)]e^{-t/\tau} \quad (5)$$

$$v = \frac{Vg(\rho - \rho_{\text{ж}})}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho - \rho_{\text{ж}})}{\eta} \quad (6)$$

Время релаксации:

$$\tau = \frac{V\rho}{6\pi\eta r} = \frac{2}{9} \frac{r^2\rho}{\eta} \quad (7)$$

Отсюда получаем выражение для вязкости жидкости:

$$\eta = \frac{2}{9} gr^2 \frac{\rho - \rho_{\text{ж}}}{v} \quad (8)$$

## Число Рейнольдса

Для проверки применимости закона Стокса вычисляется число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_{\text{ж}} vr}{\eta} \quad (9)$$

При  $Re < 0.5$  течение считается ламинарным, и формула Стокса применима.

## Экспериментальная установка

Схема установки изображена на рисунке (1).

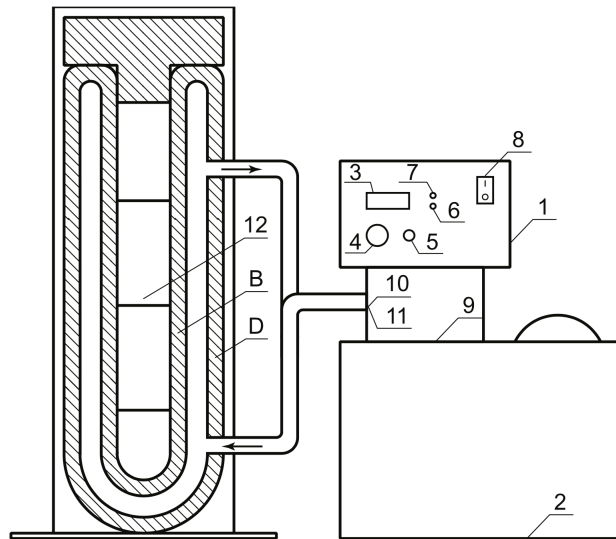


Рис. 1: Установка для определения коэффициента вязкости жидкости

Сосуд помещён в термостат с циркуляцией воды для поддержания постоянной температуры. Температура жидкости контролируется термостатом с точностью до  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Измерения проводятся при различных температурах от комнатной до  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ .

Радиусы шариков измеряются с помощью горизонтального компаратора или микроскопа. Для каждого шарика вычисляется среднее значение диаметра. Плотность шариков определяется по справочным таблицам, а плотность исследуемой жидкости — по графику зависимости  $\rho(T)$ .

Термостат оборудован цифровым индикатором температуры, системой циркуляции жидкости и нагревателем. Регулировка температуры осуществляется с помощью ручки настройки. Включение нагрева и достижение установленной температуры сопровождаются светодиодными индикаторами.

Схема устройства термостата изображена на рисунке (2).

Опыт по измерению скорости падения шариков проводится после установления термического равновесия системы. Для каждого значения температуры выполняются несколько измерений с шариками различного диаметра.

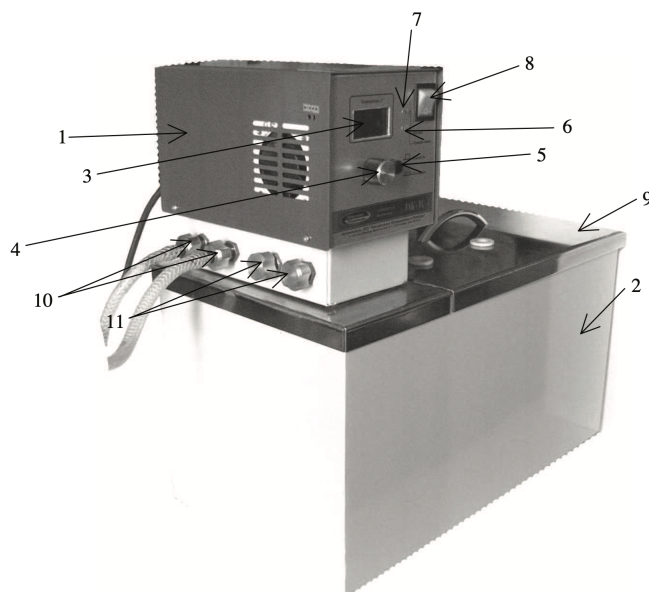


Рис. 2: Устройство термостата

## Ход работы

1. Для каждого из материалов отберём 16 шариков различного размера и с помощью микроскопа измерим их средние диаметры. Будем измерять по 4 шарика каждого материала по ходу работы. Диаметр стеклянных шариков измеряем дважды, а ??? — трижды.
2. Измерим установившиеся скорости падения шариков и вычислите вязкость  $\eta$  по формуле (8). Измерения выполним для 8 значений температуры в интервале  $25 - 60^\circ\text{C}$ .

После каждого погружения шарика в глицерин будем сразу закрывать крышку. Вязкость воды в тысячи раз меньше вязкости глицерина, поэтому следует минимизировать её возможное влияние, то есть попадание водяных паров.

Для каждого значения температуры определим плотность жидкости  $\rho_{\text{ж}}$  по графику  $\rho_{\text{ж}}(T)$ , изображенного на рисунке (3).

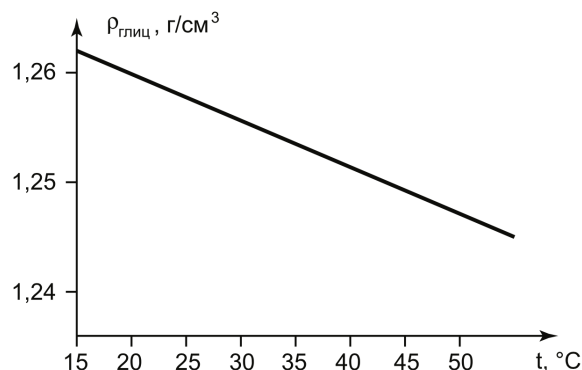


Рис. 3: Зависимость плотности глицерина от температуры

3. Для каждого из опытов вычислим значение числа Рейнольдса  $Re$  (9), оценим время релаксации  $\tau$  (7) и путь релаксации  $S = v_{\text{уст}}\tau$ . Проанализируем применимость формулы Стокса в каждом эксперименте.

4. Построим график зависимости  $\ln \eta$  от  $1/T$ .
5. По угловому коэффициенту прямой  $\ln \eta(1/T)$  с помощью формулы (??) определим энергию активации.
6. Оценим погрешность полученных результатов.

## Вывод

Все цели работы были достигнуты.

- 1.