

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{u_m}{u_R} - 0,255\right) (1 + 0,0041 \cdot 30)}{0,0041 \cdot 0,255} \rightarrow 1044,13 \left(\frac{u_m}{u_R} - 0,255\right) = \Delta T$$

Протокол  
лабораторной работы №22.

15.10.201  
Горюнов  
Кульков  
Соловьев

Определение коэффициента вязкости  
трения жидкостей.

Приборы и оборудование: цилиндрический сосуд со шкалой, микрометр,  
слюдяной диск, микрометр, тары стальные и  
пластмассовые, пипет, термометр.

$R = 4,63 \text{ см}$ ;  $\Delta t = 0,2 \text{ с}$ ;  $\Delta R = 0,05 \text{ мм}$ ;  $\Delta l = 0,01 \text{ мм}$ ;  $\rho_{\text{сталь}} = (7,80 \pm 0,04) \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ,  
 $\rho_{\text{пластм.}} = 0,222$ .

Температура воздуха  $t = 24^\circ \text{C}$

1. Измерение микрометром диаметров шариков.

№ шарика	Материал	Диаметр шарика $d$ , мм			$d_{\text{ср}}, \text{мм}$	$r_{\text{ср}}, \text{мм}$
		$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$		
1	сталь	3,94	3,93	3,94	3,94	1,97
2	алюминий	—	—	—	—	—
3	пластмасса	5,94	5,95	5,94	5,94	2,97

2. Определение длины  
пути, на которой происходит  
установление скорости для  
шарика.

№ шарика	материал	$h$ , см	5-20	10-25	15-30	20-35
1	сталь	$t$ , с	0,67	0,76	0,76	0,78
2	алюминий		—	—	—	—
3	пластмасса		2,12	2,14	2,12	2,12

3. Определение вязкости  
жидкости:  $\left( \eta = \frac{2}{9} \rho g \frac{r_m - r_{\text{ср}}}{V_0} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \frac{\eta}{R}} \right)$

№ шарика	Материал	$r_{\text{ср}}, \text{см}$	$h$ , см	$t$ , с			$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$V_0 = \frac{h}{t}$ , см/с	$\eta$ , П
				$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$			
1	сталь	0,127	40	2,03	2,02	2,05	2,033	19,6454	2,551
2	алюминий	—	—	—	—	—	—	—	—
3	пластмасса	0,297	40	5,43	5,77	5,42	5,44	6,9686	1,77



# Отчёт по лабораторной работе над "Определение коэффициента внутреннего трения жидкости"

Цель: определить коэффициент внутреннего трения мизерина.

Приборы и оборудование: цилиндрический сосуд со шкалой, мизерин, секундомер, микрометр, стальной и платиновый шпатель, линейка, термометр.

Температура воздуха: в начале опыта  $t = 24^{\circ}\text{C}$   
в конце опыта  $t = 26^{\circ}\text{C}$

## Теоретическое обоснование.

Если некоторая часть жидкости (газа) приведена в движение вдоль оси  $Ox$  и под силой, поддерживающей это движение, оно быстро прекратится, из-за того, что на поверхности раздела двух слоёв  $AB$  (рис. 1) на слой, движущийся быстрее, действует со стороны slower слоя сила трения  $F$ , замедляющая движение, на слой, движущийся медленнее, действует такая же по величине сила, ускоряющая его движение.

Это св-во называется внутренним трением или вязкостью.

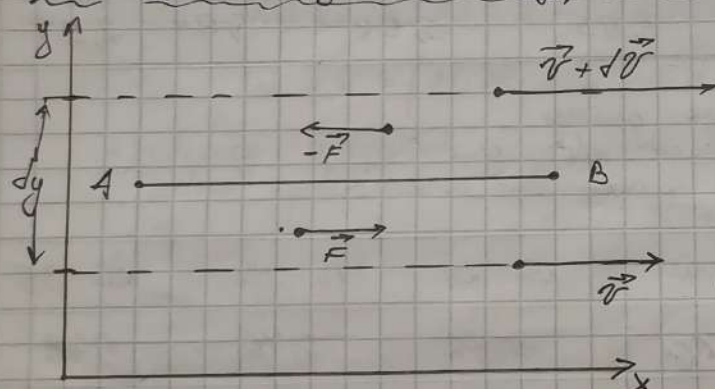


рис. 1.

Сила внутреннего трения жидкости описывается формулой

$$F = \eta S \left| \frac{dv}{dy} \right| \quad (1)$$

где  $S$  - площадь соприкосновения скользящих друг по другу слоёв.

$\frac{dv}{dy}$  - градиент ск-ти в напр. напр. течения жидкости.

$\eta$  - коэффициент пропорц.-ти, зависящий от природы жидкости, который называется коэффициентом внутреннего трения.

Размерность  $\eta$  -  $\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ , т.е. в системе СГС выражается в  $\frac{\text{г} \cdot \text{см}}{\text{с}}$  - Пуаз (в честь Пуазейля)

Вязкость жидкости сильно зависит от температуры ( $t \uparrow \rightarrow \eta \downarrow$ )

Исходя из формулы (1) выше показано, что на заданной нар радиуса  $r$ , движущийся с некоторой ск-по  $v$  в безграничной вязкой среде, действует сила трения:



$$\Delta T = \frac{(100 - 0,255) \cdot 100}{0,255} \rightarrow 1044,13 \left( \frac{100}{100} - 0,255 \right) = \Delta T$$

$$F = 6\pi\eta rV \quad (a)$$

На шар в безграничной вязкой среде действуют три силы:

$$1) F_{\text{тяжести}} = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g; \quad \rho - \text{шара.}$$

$$2) F_{\text{Архимеда}} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{ср}} g; \quad \rho_{\text{ср}} - \text{плотность среды}$$

$$3) F_{\text{внутр. тр.}} = 6\pi\eta rV = F$$

С ростом скорости шара сила  $F$  возрастает (см. формулу 2), до тех пор, пока не станет, в сумме с силой Архимеда равной силе тяжести, после чего шар падает с постоянной эк-но:

$$V_0 = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ср}}}{\eta}$$

— справедлива только для безграничной среды.

$g$  — ускорение свободного падения.  
 $\rho_{\text{ш}}$  — плотность шара.  
 $\rho_{\text{ср}}$  — плотность среды.  
 $\eta$  — вязкость среды.

При падении шарика в ограниченном пространстве, стенки замедляют падение. Для случая падения шарика вдоль оси цилиндра радиуса  $R$  и для  $r < R$  её можно исправить:

$$V_0 = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{ш}} - \rho_{\text{ср}}}{\eta} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}}$$

Если шарик падает в цилиндрической сосуде, малейшая шероховатость, то и дно сосуда оказывает влияние на скорость падения, но оно заметно сказывается только вблизи от него. (В средней части сосуда этим влиянием можно пренебречь).

Задания.  
 (расчеты величин)

① Измерение микрометром диаметров шариков.

$$1) \text{Самый: } \bar{d}_{\text{ср}} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \approx 3,94 \text{ мм} \rightarrow r_{\text{ср}} = 1,97 \text{ мм.}$$

$$\delta d = \frac{\Delta d}{d} \rightarrow \delta d_1 = \frac{0,01}{3,94} \approx 0,002538$$

$$\Delta r = 0,01 \text{ мм.}$$

$$\delta d_2 = \frac{0,01}{3,93} \approx 0,002545$$

$$\delta d_3 = \frac{0,01}{3,94} \approx 0,002538$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta d_1 \approx 0,002538 \\ \delta d_2 \approx 0,002545 \\ \delta d_3 \approx 0,002538 \end{array} \right\} \delta \bar{d}_{\text{ср}} \approx 0,00254$$

$$\Delta d = \delta \bar{d}_{\text{ср}} \cdot \bar{d}_{\text{ср}} \approx 0,01 \text{ мм.}$$

$$\Rightarrow \bar{d}_{\text{ср}} = (3,94 \pm 0,01) \text{ мм}$$



2) Площадь:  $d_{ср} = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3} \approx 5,94 \text{ мм} \rightarrow r_{ср} = 2,97 \text{ мм}$

$\Delta d = 0,01 \text{ мм}$

$$\Delta d = \frac{\Delta d}{d} \rightarrow \delta d_1 = \frac{0,01}{5,94} = 0,001684$$

$$\delta d_2 = \frac{0,01}{5,95} = 0,001681$$

$$\delta d_3 = \frac{0,01}{5,94} = 0,001684$$

$$\delta d_{ср} = 0,001683$$

$\Delta d = \delta d_{ср} \cdot d_{ср} \approx 0,01 \text{ мм}$

$d_{ср} = (5,94 \pm 0,01) \text{ мм}$

② Определение длины пути, на котором происходит установление скорости для шариков.

N шарика	Материал	h, см	5-20	10-25	15-30	20-35
1	сталь	t, с	0,64	0,46	0,46	0,48
2	алюминий		—	—	—	—
3	пластмасса		2,12	2,14	2,12	2,12

1). Сталь:  $v_1 = \frac{15 \text{ см}}{0,64 \text{ с}} = 22,39 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   $v_3 = \frac{15 \text{ см}}{0,46 \text{ с}} = 32,61 \frac{\text{см}}{\text{с}}$

$v_2 = \frac{15 \text{ см}}{0,46 \text{ с}} = 32,61 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   $v_4 = \frac{15 \text{ см}}{0,48 \text{ с}} = 31,25 \frac{\text{см}}{\text{с}}$

$v_{ср} = \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4}{4} \approx 29,21 \frac{\text{см}}{\text{с}}$

$\Rightarrow$  Установ. на участке 10-25

$\Delta h = \frac{1 \text{ см}}{2} = \frac{1 \text{ см}}{2} = 0,5 \text{ см} \rightarrow \delta h = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,5}{15} \approx 0,0333$

$\Delta t = 0,2 \text{ с}$

$v = \frac{h}{t} \Rightarrow \delta v = \delta h + \delta t$

$\delta v_1 = 0,0333 + \frac{0,2}{0,64} \approx 0,3125$

$\delta v_2 = 0,0333 + \frac{0,2}{0,46} \approx 0,4348$

$\delta v_3 = 0,0333 + \frac{0,2}{0,46} \approx 0,4348$

$\delta v_4 = 0,0333 + \frac{0,2}{0,48} \approx 0,4167$

$\delta v_{ср} \approx 0,308$

$\Delta v = \delta v_{ср} \cdot v_{ср} = 8,80 \frac{\text{см}}{\text{с}}$

$\Rightarrow v_{ср} = (29,21 \pm 8,80) \frac{\text{см}}{\text{с}}$

устанавливается в промежутке 10-25



$$\Delta T = \frac{\left(\frac{u}{u_R} - 0,255\right) (1 + 0,0041 \cdot 30)}{0,0041 \cdot 0,255} \rightarrow 1044,13 \left(\frac{u}{u_R} - 0,255\right) = \Delta T$$

2) Плотности:  $\rho_1 = \frac{15 \text{ см}}{2,12 \text{ с}} \approx 7,045 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   $\rho_3 = \frac{15 \text{ см}}{2,12 \text{ с}} \approx 7,045 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   
 $\rho_2 = \frac{15 \text{ см}}{2,14 \text{ с}} \approx 7,009 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   $\rho_4 = \frac{15 \text{ см}}{2,12 \text{ с}} \approx 7,045 \frac{\text{см}}{\text{с}}$   
 $\rho_{\text{ср}} = \frac{\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4}{4} = 7,0585 \frac{\text{см}}{\text{с}}$

$\Rightarrow$  Установив. на участке 5-20

$$\Delta h = \frac{L}{2} = \frac{u}{2} = 0,5 \text{ см} \rightarrow \delta h = \frac{\Delta L}{L} = \frac{0,5}{15} \approx 0,0333$$

$$\Delta t = 0,2 \text{ с}$$

$$\rho = \frac{h}{t} \Rightarrow \delta \rho = \delta h + \delta t$$

$$\delta \rho_1 = 0,0333 + \frac{0,2}{2,12} \approx 0,12464$$

$$\delta \rho_2 = 0,0333 + \frac{0,2}{2,14} \approx 0,12646$$

$$\delta \rho_3 = 0,0333 + \frac{0,2}{2,12} \approx 0,12464$$

$$\delta \rho_4 = 0,0333 + \frac{0,2}{2,12} \approx 0,12464$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta \rho_1 \\ \delta \rho_2 \\ \delta \rho_3 \\ \delta \rho_4 \end{array} \right\} \delta \rho_{\text{ср}} \approx 0,124$$

$$\Delta \rho = \delta \rho_{\text{ср}} \cdot \rho_{\text{ср}} = 0,124 \cdot 7,0585 \approx 0,8964 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

$$\Rightarrow \rho_{\text{ср}} = (7,0585 \pm 0,8964) \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

$\sim$  установившаяся в промежутке 5-20

3) Определение вязкости жидкости:  $\left( \eta = \frac{2}{9} R^2 g \frac{\alpha_{\text{ж}} - \alpha_{\text{ср}}}{v_0} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \frac{R}{R_0}} \right)$

1) Время:  $t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \approx 2,03 \text{ с}$

$$v_0 = \frac{h}{t_{\text{ср}}} = 19,6454 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{2}{9} \cdot (0,194 \text{ см})^2 \cdot 980,665 \frac{\text{см}}{\text{с}^2} \cdot \frac{4,8 \frac{\text{с}^2}{\text{см}^3} - 1,26 \frac{\text{с}^2}{\text{см}^3}}{19,6454 \frac{\text{см}}{\text{с}}} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \cdot \frac{0,194 \text{ см}}{4,63 \text{ см}}} \approx 255 \text{ П}$$

2) Плотности:  $\rho_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{3} \approx 5,44 \text{ с}$

$$v_0 = \frac{h}{t_{\text{ср}}} = 6,9686 \frac{\text{см}}{\text{с}}$$

$$\Rightarrow \eta = \frac{2}{9} \cdot (0,294 \text{ см})^2 \cdot 980,665 \frac{\text{см}}{\text{с}^2} \cdot \frac{2 \frac{\text{с}^2}{\text{см}^3} - 1,26 \frac{\text{с}^2}{\text{см}^3}}{6,9686 \frac{\text{см}}{\text{с}}} \cdot \frac{1}{1 + 2,4 \cdot \frac{0,294 \text{ см}}{4,63 \text{ см}}} \approx 1,44 \text{ П}$$

$$\delta \eta = 2 \delta r + \delta(\alpha_{\text{ж}} - \alpha_{\text{ср}}) + \delta v_0 + \delta R + \delta r$$

В цилиндрических со счетом:

$$\delta(\alpha_{\text{ж}} - \alpha_{\text{ср}}) = \frac{\Delta \alpha_{\text{ж}} + \Delta \alpha_{\text{ср}}}{|\alpha_{\text{ж}} + \alpha_{\text{ср}}|} = \frac{0,04 + 0,05}{4,8 - 1,26} \approx 0,014$$

$$\delta r = \frac{\Delta r}{r} = \frac{0,005}{0,194} \approx 0,025$$



$$\delta h = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,5}{40} = 0,0125$$

$$\delta t_1 = \frac{0,2}{2,03} \approx 0,0985$$

$$\delta t_2 = \frac{0,2}{2,02} \approx 0,099$$

$$\delta t_3 = \frac{0,2}{2,05} \approx 0,0976$$

$$\left. \begin{array}{l} \delta t_1 \\ \delta t_2 \\ \delta t_3 \end{array} \right\} \delta t_{\text{ср.}} \approx 0,0984$$

$$\delta t = \frac{0,2}{t_{\text{ср.}}} = \frac{\Delta t}{t_{\text{ср.}}} \approx 0,0984$$

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,005 \text{ см}}{4,63 \text{ см}} \approx 0,0011$$

$$\delta \eta_1 = 3\delta r + \delta(\alpha_{\text{ш}} - \alpha_{\text{ср.}}) + \delta h + \delta t + \delta R = 0,201$$

В измерениях с массомассой:

$$\delta(\alpha_{\text{ш}} - \alpha_{\text{ср.}}) = \frac{\Delta \alpha_{\text{ш}} + \Delta \alpha_{\text{ср.}}}{|\alpha_{\text{ш}} - \alpha_{\text{ср.}}|} = \frac{0,04 + 0,05}{|2 - 1,26|} \approx 0,1216$$

$$\delta r = \frac{\Delta r}{r} = \frac{0,005}{0,294} \approx 0,0168$$

$$\delta h = \frac{\Delta h}{h} = \frac{0,5}{40} = 0,0125$$

$$\delta t = \frac{\Delta t}{t_{\text{ср.}}} = \frac{0,2}{5,74} \approx 0,0348$$

$$\delta R = \frac{\Delta R}{R} = \frac{0,005}{4,63} \approx 0,0011$$

$$\delta \eta_2 = 3\delta r + \delta(\alpha_{\text{ш}} - \alpha_{\text{ср.}}) + \delta h + \delta t + \delta R = 0,2204$$

$$\eta_{\text{ср.}} = \frac{\eta_1 + \eta_2}{2} = \frac{2,55 + 1,94}{2} = 2,16 \text{ П}$$

$$\delta \eta_{\text{ср.}} = \frac{0,2204 + 0,201}{2} = 0,2107$$

$$\Delta \eta = \delta \eta_{\text{ср.}} \cdot \eta_{\text{ср.}} \approx 0,46$$

$$\Rightarrow \eta_{\text{ср.}} = (2,16 \pm 0,46) \text{ П}$$

Вывод: 1) Измерили с помощью микрометра диаметры шариков и выразили через них радиусы:

$$r_{\text{ср.}} = (3,94 \pm 0,01) \text{ мм}$$

$$r_{\text{ш.}} = (5,94 \pm 0,01) \text{ мм}$$

2) Определены участки пути, на которых установка.

1) У стальной в. пр.  $\rightarrow$  10-25.

2) У латун. ц. в. пр.  $\rightarrow$  5-20

$\Rightarrow$  можно наблюдать экстер. с 10 до 50  $\Rightarrow L = 40 \text{ см}$ .

$$\Delta T = \frac{\Delta h}{h}$$

3)

Прибор и

$$\Delta h =$$

Из II  
получается

Сила

a) F<sub>г</sub>

b) F<sub>г</sub>

b) F<sub>г</sub>

$$a = \frac{mg}{2}$$

~ u

3-x

$\rightarrow a$

N	h, см
I	m = 12,562
II	m = 48,35
III	m = 20,32
	m =



$$\Delta T = \frac{(\frac{m}{m_0} - 0,255)(1 + 0,0041 \cdot 30)}{0,0041 \cdot 0,255} \rightarrow 1044,13 (\frac{m}{m_0} - 0,255) = \Delta T$$

3) Определили высоту измерения:

$$\eta = (2,16 \pm 0,46) \text{ м}$$

22.10.2020

Мурман

Протокол.  
Лабораторная работа № 8.

Изучение законов движения при помощи  
машинки Аттудора.

Аппаратура и оборудование: блок, штырь, две машинки, измерительная лента,  
перезагрузочные массы  $m$ , грузы массы  $M$ .

$$M = 363 \text{ г.}$$

$$\Delta h = 0,5 \text{ см}; \Delta t = 0,01 \text{ с} \quad \Delta M = 0,5 \text{ г.} \quad \Delta m = 0,5 \text{ г.}$$

Задача:

Из II з-на Мопсона для грузов с учетом идеализации системы  
получается формула для ускорения грузов.

Сила трения может иметь разный характер:

$$a) F_{\text{тр.}} = F_0 = \text{const}$$

$$b) F_{\text{тр.}} = F(v) - \text{сила тр. зависит от скорости}$$

$$b) F_{\text{тр.}} = F(a) = F_0 + \alpha a - \text{зависит от ускорения}$$

Задача 1. Проверка зависимости  
 $F_{\text{тр.}}$  от скорости  $v$ .

$$a = \frac{mg - F(v)}{2M + m} \neq \text{const.}$$

~ Можно проверить, сняв показания  $h(t)$  и построив графики  $h(t)$  для  
3-х разных по массе перегрузов  $m$ . Эти графики получ. в виде прямой  
 $\rightarrow a = \text{const}$  для каждого из грузов и гипотеза  $F_{\text{тр.}} = F(v)$  не проверяется.

N	1	2	3	4	5
$h, \text{см}$	150	135	120	105	90
$t, \text{с}$	5,05	5,16	5,22	5,27	5,34
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	5,143	5,17	5,17	5,17	5,17
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	26,450	23,203	19,954	17,808	15,705
$t, \text{с}$	4,18	4,12	4,14	3,94	3,92
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	4,147	3,927	3,697	3,47	3,203
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	17,198	15,421	13,668	12,041	10,259
$t, \text{с}$	3,34	3,29	3,27	3,09	3,09
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	3,3	3,097	2,917	2,717	2,543
$t_{\text{ср}}, \text{с}$	10,89	9,591	8,509	7,382	6,620