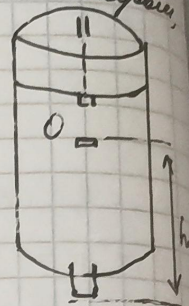


Лабораторная работа №16.

Протокол.

Определение вязкости воздуха.

Прибор и оборудование: стеклянный сосуд с шаровой манометром, рабочая с пластинкой вставленной манометром, секундомер.



$$R_{\text{манометра}} = 1,62 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$L_{\text{манометра}} = 3,4 \text{ м}$$

$$h_0 = 59,0 \text{ см}$$

$$S = 18,5 \text{ см}^2$$

$$\rho_{\text{воздуха}} = 1,29 \text{ кг/м}^3$$

$$\Delta t = 0,2 \text{ с}, \Delta R = 0,0001 \text{ м}, \Delta L = 0,1 \text{ м}, \Delta h_0 = 0,1 \text{ см}$$

$$t^\circ = 20^\circ \text{ C}$$

$$\rho = 748 \text{ мм.рт.ст.}$$

Метки	$h, \text{ см}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_{\text{среднее}}, \text{ с}$	$\ln(h/h_0)$
2	54	16,41	15,42	15,70	15,94	-0,03449
4	55	33,05	32,07	32,49	32,54	-0,04020
6	53	48,86	48,63	49,21	48,90	-0,10425
8	51	66,93	66,94	67,67	67,18	-0,14541
10	49	85,47	85,76	86,72	85,98	-0,18542
12	47	104,45	104,36	104,92	104,58	-0,22439
14	45	124,18	123,68	124,22	124,03	-0,24088
16	43	144,07	144,64	145,16	144,62	-0,31637
18	41	166,41	165,92	166,80	166,38	-0,36387
20	39	188,64	188,79	188,93	188,79	-0,41398
22	37	212,04	211,97	213,71	212,57	-0,48882
24	35	238,13	236,85	237,73	237,80	-0,52219
26	33	262,13	262,58	263,59	262,74	-0,58103
28	31	289,35	290,02	292,20	290,52	-0,64355
30	29	318,65	320,44	322,00	320,36	-0,710242
32	27	351,84	351,46	352,79	352,03	-0,78140
34	25	383,91	385,34	386,96	385,40	-0,85866
36	23	419,84	420,70	421,11	420,55	-0,94204
38	21	460,50	460,53	461,63	460,89	-1,03302
40	19	504,35	504,28	505,33	504,65	-1,13210
42	17	550,72	550,35	551,86	550,98	-1,24432
44	15	602,68	603,95	604,89	603,84	-1,36948
46	13	663,51	662,56	662,89	662,99	-1,51259

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho g}{8 L S \Delta t}$$

Горюнов

17.02.21

Алимов

Опыт по лабораторной работе № 16.
 Определение вязкости воздуха.

Цель работы: определить вязкость воздуха.

Оборудование: стеклянный сосуд с мерной шкалой, прибор с капилляром, секундомер.

$$R_{\text{капилляра}} = 1,62 \cdot 10^{-2} \text{ см.}$$

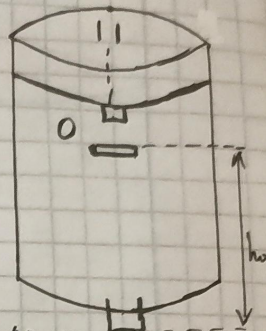
$$L_{\text{капилляра}} = 9,4 \text{ см}$$

$$h_0 = 59,0 \text{ см}$$

$$S = 18,5 \text{ см}^2$$

$$\rho_{\text{возд}} = 1,2 \text{ г/см}^3$$

$$\Delta t = 0,2 \text{ с}, \Delta R = 0,0001 \text{ см}, \Delta L = 0,1 \text{ см}, \Delta h_0 = 0,1 \text{ см.}$$



Температура и давление в помещении во время эксперимента: $t = 20^\circ \text{C}$, $p = 748 \text{ мм. рт. ст.}$

Теоретическая часть.

В неоднородном потоке, газа (жидкости) между соседними слоями, движущимися с различными скоростями, действует силы вязкого трения, которые приводят более быстрый слой и ускоряют медленнее. На молекулярном уровне силы вязкого трения связаны с переносом импульса между слоями газа [1]. Для потока, скорость которого направлена вдоль оси x и зависит от координаты y (рис. 1), т.е. $v_x = v_x(y)$, силы вязкого трения F определяются формулой.

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

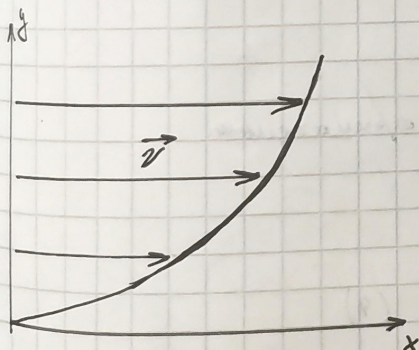


Рис. 1. Неоднородный поток газа

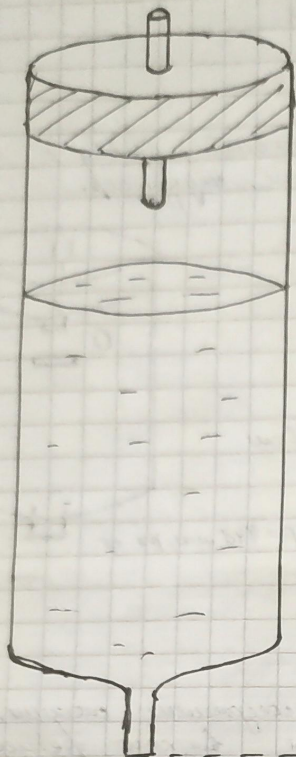
где S - площадь взаимодействующих слоев, η - коэффициент вязкости. В системе СИ коэффициент вязкости измеряется в пуазах (П) и имеет размерность $\text{г/(см} \cdot \text{с)}$

Коэффициент вязкости можно измерить, измеряя течение газа через цилиндрическую трубку малого сечения (капилляр). При ламинарном течении газа по капилляру связь между разностью давлений газа Δp на концах капилляра и объемом Q газа, протекающим через капилляр в единицу времени, дается формулой Пуазейля [2].

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta L} \Delta p \quad (2)$$

где R - радиус капилляра, а L - его длина. Измеряя на опыте Q и Δp , по формуле (2) можно определить (при известных значениях R и L) коэффициент вязкости η .

Экспериментальная установка.



Экспериментальная установка для определения коэффициента вязкости воздуха представляет собой цилиндрический сосуд с подвижным отверстием внизу, который сверху закрывается пробкой с плотно вставленным в нее капилляром (рис. 2). К сосуду прикреплена вертикальная шкала для измерения уровня воды в сосуде.

Сосуд частично заполняют водой (или закрывают нижним отверстием) и закрывают пробкой с капилляром. Затем нижнее отверстие открывают, и вода начинает вытекать. При этом объем воздуха в сосуде возрастает, а его давление понижается (воздух не успевает поступать в сосуд через капилляр).

В результате скорость вытекания воды начинает уменьшаться. Когда скорость вытекания становится достаточно малой, разность давлений воздуха вне сосуда (атмосферного давления) и внутри сосуда можно считать равной статическому давлению столба воды, изменяющейся со временем высоты $h(t)$, т.е.

$\rho g h(t)$, где ρ - плотность воды, g - ускорение свободного падения. Такая же разность давлений устанавливается и на концах капилляра, т.е. $\Delta p = \rho g h(t)$.

Объем Q воздуха, вытекающего через капилляр за t секунд, равен объему вытекающей за 1 секунду воды q , таким образом, равен скорости понижения уровня воды, умноженной на площадь сечения сосуда:

$$Q = -S \frac{dh}{dt} \quad (3)$$

Знак "-" указывает, что производная $\frac{dh}{dt}$ отрицательна.

Из формул (2) и (3) следует

$$S \frac{dh}{dt} = - \frac{\pi R^4}{8\eta L} \rho g h \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), находим, что понижение уровня воды в сосуде происходит по экспоненциальному закону:

$$h(t) = h_0 e^{-t/\tau} \quad (5)$$

где $\tau = \frac{8\eta L \rho g}{\pi R^4}$ - характерное время вытекания воды, h_0 - высота уровня воды в момент начала отсчета времени.

Метки
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
36
38
40
42
44
46

Смещение

Примечание

Практическая работа

$$1044.13 \left(\frac{u_n}{u_n} - 0,255 \right) = \Delta T$$

Метки	h, см	t ₁ , с	t ₂ , с	t ₃ , с	t _{ср} , с	ln(h/h ₀)
2	57	16,41	15,72	15,40	15,94	-0,03449
4	55	83,06	32,04	32,49	32,54	-0,07020
6	53	48,88	48,83	49,21	48,90	-0,10725
8	51	68,93	68,94	67,87	67,18	-0,14541
10	49	85,47	85,48	88,42	85,98	-0,18572
12	47	104,45	104,38	104,92	104,58	-0,22739
14	45	124,18	123,68	124,22	124,03	-0,27088
16	43	144,07	144,64	145,18	144,62	-0,31834
18	41	168,41	165,92	168,80	166,38	-0,36397
20	39	188,84	188,49	188,93	188,49	-0,41398
22	37	212,04	211,97	213,41	212,57	-0,46682
24	35	238,13	238,85	237,72	236,90	-0,52219
26	33	262,13	262,58	263,59	262,74	-0,58103
28	31	289,35	290,02	292,20	290,52	-0,64355
30	29	318,65	320,44	322,00	320,36	-0,710242
32	27	351,84	351,48	352,49	352,03	-0,78170
34	25	383,91	385,34	386,98	385,40	-0,85866
36	23	419,84	420,70	421,11	420,55	-0,94204
38	21	460,50	460,53	461,63	460,89	-1,03302
40	19	504,35	504,28	505,33	504,65	-1,13310
42	17	550,72	550,35	551,88	550,98	-1,24432
44	15	602,68	603,95	604,89	603,84	-1,36949
46	13	663,51	662,58	662,89	662,99	-1,51259

$$\eta = \frac{5R^2 g}{8 \ell^2 \rho c}$$

Выведение погрешностей: $\Delta t = 0,2 \text{ с}$; $\Delta h = \Delta h_0 = 0,1 \text{ см}$

Дифференциальное уравнение: $y = a x_1 + b x_2$

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \Delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2}$$

$$\Rightarrow \Delta \ln \left(\frac{h}{h_0} \right) = \sqrt{\left(\frac{1}{h_0} \cdot \Delta h \right)^2 + \left(\frac{1}{h} \cdot \Delta h \right)^2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{h_0} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2}$$

Примечание к таблице: h - высота столба жидкости (h(t), см);
 t₁, t₂, t₃ - время измерения столба
 жидкости в 1, 2 и 3 опыте соответ-
 ственно;
 t_{ср} - среднее из t₁, t₂, t₃;
 h₀ - начальная высота столба жидкости.

Таблица погрешностей.

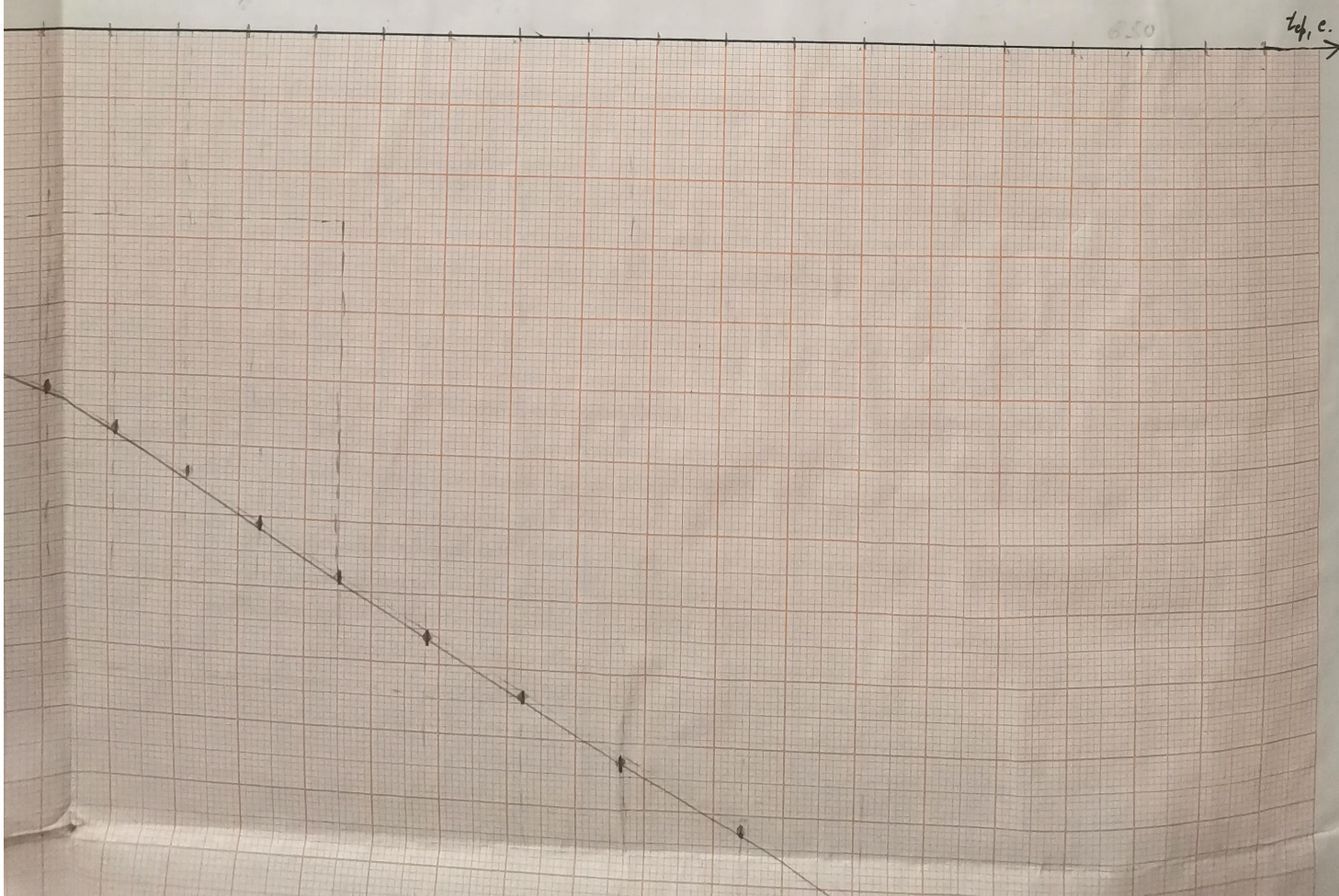
$h, \text{см}$	$\Delta \ln(\frac{h}{h_0}) = \sqrt{(\frac{\Delta h}{h_0})^2 + (\frac{\Delta h}{h})^2}$	$\ln(\frac{h}{h_0})$	$\Delta t, \text{с}$	$\Delta h, \text{см}$	$h_0, \text{см}$
57	0,0024	-0,03449			
55	0,0025	-0,04020			
53	0,0025	-0,10725			
51	0,0026	-0,14571			
49	0,0027	-0,18572			
47	0,0027	-0,22439			
45	0,0028	-0,24088			
43	0,0029	-0,34634			
41	0,0030	-0,36397			
39	0,0031	-0,41898			
37	0,0032	-0,46862			
35	0,0033	-0,52219			
33	0,0035	-0,58103			
31	0,0036	-0,64355			
29	0,0038	-0,46242			
27	0,0041	-0,48170			
25	0,0043	-0,85866			
23	0,0047	-0,94204			
21	0,0051	-1,08302			
19	0,0055	-1,13310			
17	0,0061	-1,24432			
15	0,0069	-1,36949			
13	0,0079	-1,51259			

0,2

0,1

59

Построить график, используя данные таблицы.



Температура воздуха, температуры поверхности радиатора

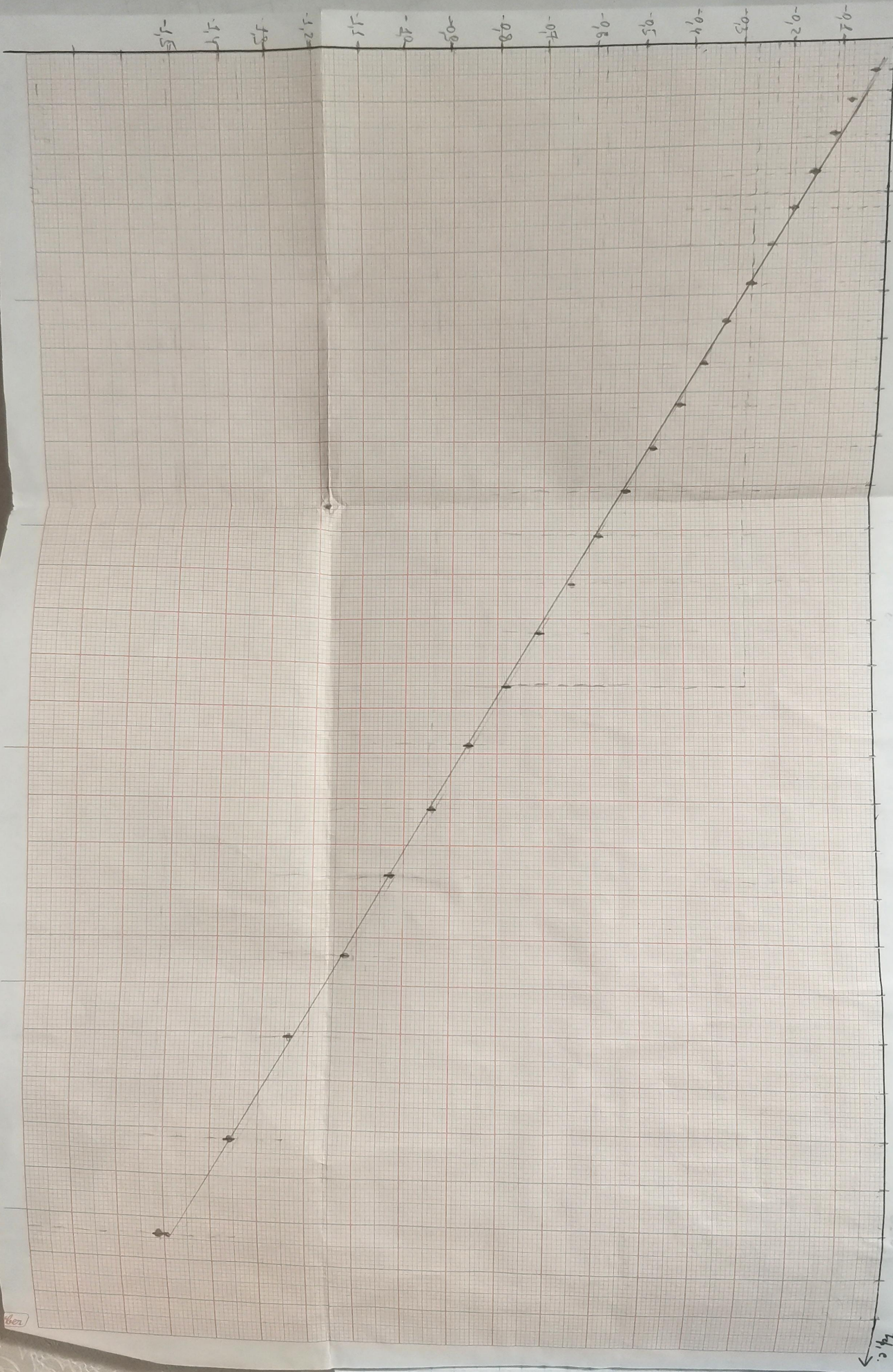
13 0,00 ± 0,01

$\Delta \ln(\frac{h}{h_0})$

62 78

870

$t_{\text{пл}}, \text{с}$



8

Видно, что графиком $\ln(\frac{h}{h_0})$ от t является прямая. $\rightarrow 1044,13 (\frac{h_0}{h_0} - 0,255) = \Delta t$?

$$h(t) = h_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{h(t)}{h_0} \rightarrow -\frac{t}{\tau} = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right)$$

$$\Rightarrow \tau = -\frac{t}{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)} = -\frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{h}{h_0}\right)}{t}} = -\frac{1}{k}, \text{ где}$$

k - коэффициент наклона
прямой (из графика)

По графику: $\tau \approx \frac{1}{\frac{0,508}{20,2}} = 447 \text{ с.}$

Расчет коэффициента
вязкости.

$$\eta = \frac{\pi R^2 \rho g \tau}{8 h S}$$

$$\delta \eta = 4 \delta R + \delta L = 4 \cdot \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta L}{L_{\text{измеряема}} \approx 0,0541 = 5,41 \%$$

$$\eta = \frac{\pi \cdot (1,82 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 981 \cdot 1 \cdot 447}{8 \cdot 3,4 \cdot 18,5} \approx 18,86 \cdot 10^{-5} \text{ П}$$

$$\Delta \eta = \delta \eta \cdot \eta \approx 1,02 \cdot 10^{-5} \text{ П}$$

$$\Rightarrow \eta \approx (18,86 \pm 1,02) \cdot 10^{-5} \text{ П}$$

Вывод: В результате работы была измерена вязкость воздуха.

$$\eta = (18,86 \pm 1,02) \cdot 10^{-5} \text{ П}$$

* определена зависимость отношения высоты столба жидкости к максимальной высоте от времени ($\ln(\frac{h}{h_0})$ от t)

Примечание: было замечено, что, когда вода оставалась мало (при $h < 9 \text{ см.}$), она не текла сверху, а как будто капала (периферически оставалось "текло").

17.03.21