

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Факультет інформатики та обчислювальної техніки

Кафедра інформатики та програмної інженерії

Звіт

з лабораторної роботи № 4 з дисципліни
«Ігрова фізика»

«Визначення коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса»

Виконав(ла)

ІП-11 Панченко Сергій Віталійович

(шифр, прізвище, ім'я, по батькові)

Перевірив(ла)

Скирта Юрій Борисович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Київ 2022

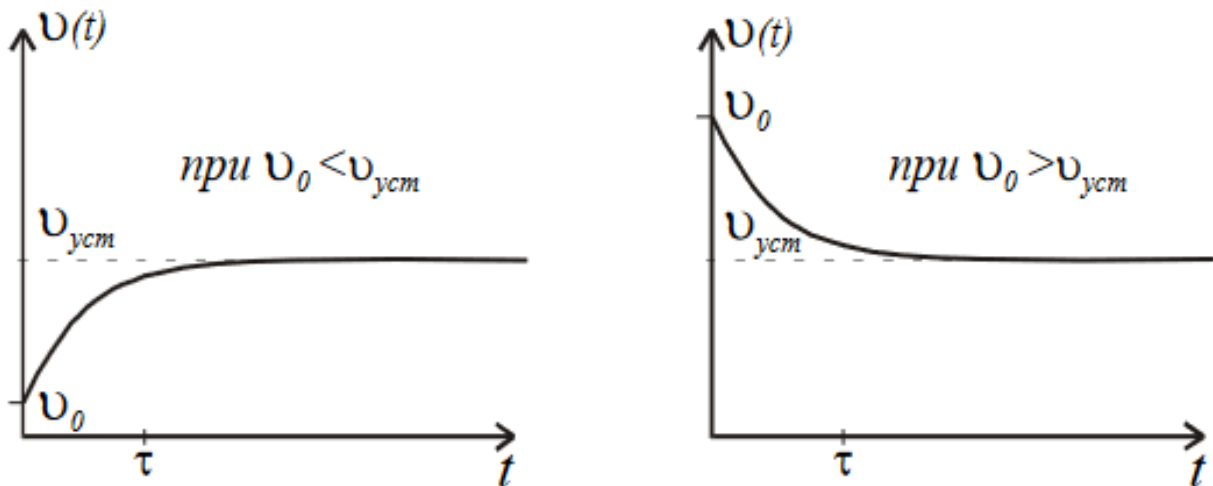
Теоретичний конспект

На рухоме тіло у в'язкій рідині діє сила опору, яка залежить від форми тіла, характеру обтікання, коефіцієнта в'язкості рідини тощо. Характер обтікання тіла рідиною визначається числом Рейнольдса (Re). Повна сила опору складається з опору тертя та опору тиску, а їхній відносний внесок визначається значенням Re . Обтікання буде ламінарним за виконання умови: $Re < Re_{кр}$, де $Re_{кр}$ – критичне значення числа Рейнольдса. Під час обтікання кульки необмеженою в'язкою рідиною та виконанні нерівності $Re = \frac{vr\rho_1}{\eta} \ll 1$. Сила опору F_C визначається формулою Стокса: $F_C = 6\pi r \eta v$ (шість піруетів), де η, ρ_1 – коефіцієнт в'язкості та густина рідини, v — швидкість кульки, r – її радіус. З'ясувавши характер руху кульки під час повільного падіння у необмеженій в'язкій рідині, отримаємо рівняння:

$$v(t) = Ce^{-\frac{6\pi r \eta}{\rho V} t} + \frac{Vg(\rho - \rho_1)}{6\pi r \eta}. \text{ Проаналізувавши розв'язок, отримаємо, що при } t \rightarrow \infty$$

маємо $v \rightarrow v_{уст} = \frac{Vg(\rho - \rho_1)}{6\pi r \eta}$, де умова $t \rightarrow \infty$ з фізичної точки зору означає, що $t \gg \tau$,

де $\tau = \frac{\rho V}{6\pi r \eta}$ – так званий час релаксації, тобто час, протягом якого рух кульки набуде усталеного характеру. Графіки залежності швидкості від часу виглядають так:



Вимірюючи усталену швидкість падіння кульки $v_{уст}$ та величини

r, ρ, ρ_1 , можна визначити коефіцієнти в'язкості рідини за формулою:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_1}{v_{уст}}. \text{ У лаборатоній роботі визначимо коефіцієнт в'язкості}$$

гліцерину. Гліцерин змінює коефіцієнт в'язкості від рівня нагрітості.

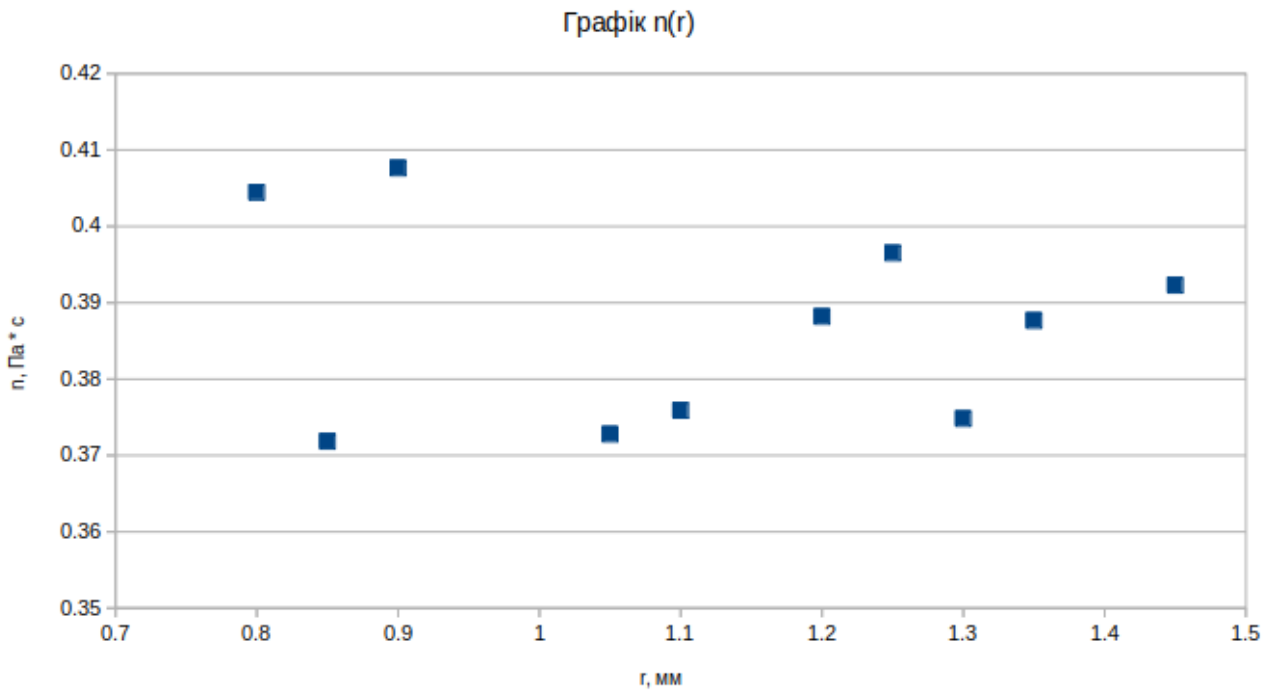
Результати дослідів

| | |
|--------------------------|----------------------------------|
| Густина матеріалу кульок | $11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ |
| Густина гліцерину | $1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ |
| Відстань між позначками | const |
| Температура гліцерину | 25.4° |

| N_0 | d (мм) | l (м) | t (с) | $v_{\text{усм}}$ (м/с) | η (Па·с) | $\eta_i - \langle \eta \rangle$ (Па·с) | $(\eta_i - \langle \eta \rangle)^2$ (Па·с) ² |
|-------|-------------|------------|------------|------------------------|---------------|---|--|
| 1 | 1.6 | 1.011 | 29.047 | 0.03480566 | 0.40445019 | 0.01723997 | 0.00029722 |
| 2 | 2.4 | 0.988 | 12.109 | 0.08159220 | 0.38819395 | 0.00098374 | 0.00000097 |
| 3 | 1.8 | 1.01 | 23.109 | 0.04370592 | 0.40764276 | 0.02043255 | 0.00041749 |
| 4 | 2.6 | 0.984 | 9.922 | 0.09917355 | 0.37482260 | -0.01238762 | 0.00015345 |
| 5 | 2.7 | 1.005 | 9.719 | 0.10340570 | 0.38766625 | 0.00045604 | 0.00000021 |
| 6 | 2.9 | 1.015 | 8.61 | 0.11788618 | 0.39229073 | 0.00508052 | 0.00002581 |
| 7 | 2.1 | 1.052 | 16.172 | 0.06505070 | 0.37278766 | -0.01442255 | 0.00020801 |
| 8 | 1.7 | 1.007 | 23.562 | 0.04273831 | 0.37183945 | -0.01537076 | 0.00023626 |
| 9 | 2.5 | 1.009 | 11.641 | 0.08667640 | 0.39650995 | 0.00929973 | 0.00008649 |
| 10 | 2.2 | 1.01 | 14.265 | 0.07080266 | 0.37589860 | -0.01131161 | 0.00012795 |
| | | | | $\langle \eta \rangle$ | 0.38721021 | | |

Формули для обчислення:

$$v = \frac{l}{t}; \eta = \frac{2}{9} \frac{gr^2(\rho - \rho_1)}{v_{\text{усм}}}; \langle \eta \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \eta_i}{10} \approx 0.38721$$



Отже, провівши розрахунки, було визначено, що вміст гліцерину складає 95% його маси згідно з таблицею 5.1, де $\eta = 387,21$ [Па * с] лежить блтзько до 365.0 [Па * с].

Похибки вимірювань (коефіцієнт надійності $\alpha=0,9$)

$$S_{\langle \eta \rangle} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\eta_i - \langle \eta \rangle)^2} \approx 0.00415512 (\text{Па} * \text{с})$$

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm t_{\alpha, n} * S_{\langle \eta \rangle} = 0.38721 \pm 1.73 * 0.00415512 = 0.38721 \pm 0.00718835 (\text{Па} * \text{с})$$

Висновок

Під час лібораторної роботи, було опрацьовано теоретичний матеріал, проведено 10 дослідів, де значення бралися з відповідного імітатора Stocks.exe. Було знайдено швидкост падіння, довжину шляху, значення коефіціжнта в'язкості гліцерину, середнє арифметичне, інтервали довіри до нього, вміст гліцерину у водному розчині. Як результат, бачимо, що коефіцієнт в'язкості не залежить від маси кульки.

Контрольні запитання

1. Ламінарний і турбулентний рух. Число Рейнольдса.

Число Рейнольдса – це числова характеристика обтікання тіла рідиною, яка визначається за формулою:

$$Re = \frac{\rho u l}{\eta}$$

, де ρ – густина рідини, u – швидкість, l – довжина, η – в'язкість.

Ламінарний рух течії - це такий рух, за якого сусідні шари рідини не змішуються. Він відбувається за умови що число Рейнольдса буде меншим за критичне число Рейнольдса, тобто $Re < Re_{кр}$. Натомість турбулентний рух – це рух течії, що супроводжується утворенням вихорів (сусідні шари рідини змішуються). Він відбувається, коли число Рейнольдса більше за критичне число Рейнольдса, тобто $Re > Re_{кр}$.

Отже, **критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$** – це така границя числа Рейнольдса для рідини, при якій ламінарний рух її течії переходить в турбулентний.

2. Формула Стокса. Умова її застосовності

Формула Стокса (або сили опору рідини):

$$F_c = 6 \pi r \eta v$$

застосовується, коли кульку обтікає необмежена в'язка рідина і виконується умова:

$$Re = \frac{v r \rho_1}{\eta} \ll 1 ,$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини, u – швидкість кульки, r – радіус кульки, ρ_1 – густина рідини, Re – число Рейнольдса.

3. Ідея вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса.

Ідея вимірювання коефіцієнта в'язкості рідини методом Стокса полягає у тому, що визначення в'язкості проводиться шляхом приблизного вимірювання швидкості усталеного руху кульки у в'язкій рідині, і знаючи яку, а також густину, радіус кульки та густину рідини, можна визначити коефіцієнт в'язкості рідини за формулою:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_1}{v_{уст}},$$

де r – радіус кульки, ρ – густина кульки, ρ_1 – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, $v_{уст}$ – усталена швидкість руху.

4. Які кульки потрібно використовувати для вимірювань?

Радіуси кульок мають задовольняти умову:

$$r^3 \ll \frac{9}{2} \frac{\eta^2}{(\rho - \rho_1) \rho_1 g},$$

де η – коефіцієнт в'язкості рідини, ρ – густина кульки, ρ_1 – густина рідини, g – прискорення вільного падіння.

5. На якій відстані від відкритої поверхні гліцерину слід наносити верхню позначку?

Мінімальна відстань від відкритої поверхні рідини, на якій треба розміщувати верхню позначку, визначається за формулою:

$$S \approx \frac{8}{81} g r^4 \frac{\rho(\rho - \rho_1)}{\eta^2},$$

де r – радіус кульки, ρ – густина кульки, ρ_1 – густина рідини, g – прискорення вільного падіння, η – коефіцієнт в'язкості рідини.

Підставивши густину гліцерину $\rho_1 = 1200 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, отримаємо:

$$S \approx \frac{8}{81} g r^4 \frac{\rho(\rho - 1200)}{\eta^2}$$