

Calculation of the parameters necessary to estimate the thermal conductivity coefficient of air:

- air density: $\rho =$
- specific heat: $c_V =$
- free path: $\ell =$
- thermal speed: $v_T =$

air thermal conductivity:

$$\kappa_{\text{air}} \sim \frac{1}{3} \rho c_V \ell v_T =$$

Comparison result, conclusion

6. Electrical resistance of tungsten at high and low temperatures

a) Results of the necessary measurements and calculation of the temperature coefficient of resistance for tungsten in the range from the room temperature to the temperature of melting ice:
the temperature coefficient of resistance:

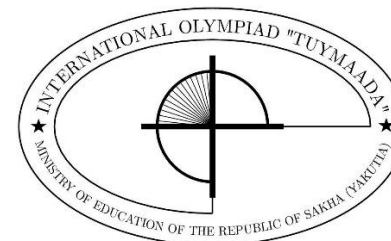
$$\alpha =$$

b) The necessary measurements, calculations, figures (on the graph paper) and the conclusion that the linear dependence $R(t)$ is feasible at the high temperatures $\sim T_r = 3000^\circ\text{C}$:

c) The necessary measurements, calculations, figures (on the graph paper) and the conclusion that the linear dependence $R(t)$ is feasible at the low temperatures $\sim T_N \approx 77\text{ K}$:

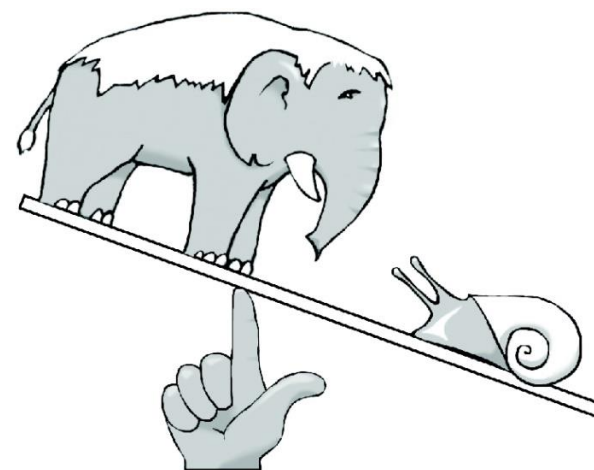
Министерство образования Республики Саха (Якутия)
Малая академия наук Республики Саха (Якутия)
Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

XXVI Международная олимпиада «Туймаада»



Физика

Экспериментальный тур
Методическое пособие



Якутск, 8-14 июля, 2019 г.

Комплект задач подготовлен методической комиссией по физике
 Министерства образования Республики Саха (Якутия)
 и Северо-Восточного федерального университета им. М.К.
 Аммосова.
 Телефон: (4112) 496862.
 E-mail: petyan1993@yandex.ru, neustr@mail.ru, grigyum@yandex.ru.

Авторы задач

Младшая лига

Власов А.И.

Старшая лига

Гуденко А.В.

Общая редакция — Неустроев Е.П.
 Перевод — Алексеев С.Н., Сивцев И.А., Боякинов Е.Ф.
 Оформление и вёрстка — Неустроев Е.П.
 Коррекция — Гуденко А.В., Алексеев С.Н., Неустроев Е.П.
 Ответственный за комплект задач — Григорьев Ю. М.
 Подготовка экспериментальных установок — Гуденко А.В., Власов
 А.И., Ноговицын П.И., Потапов В.Ф.

© Авторский коллектив
 Подписано в печать 10.07.2019 в 16:50.
 677016, г. Якутск, ул. Белинского, д. 58
 Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

7. Einstein temperature for steel (iron)

a) the amount of heat Q_{exp} that a steel nut receives when heated from nitrogen T_N to the temperature of melting ice T_0 (experiment)
- experiment method (1-2 sentences): - working formula: $Q_{exp} =$ - measurement results: - numerical value: $Q_{exp} =$
b) the amount of heat Q_{theor} , which the steel nut receives when heated from nitrogen T_N to the temperature of melting ice T_0 (theoretical calculation according to the Einstein model)
Derivation of the formula for Q_{theor}: $Q_{theor}:$ Formula for Q_{theor}: $Q_{theor}:$
c) The numerical value of the Einstein temperature as a result of a solution of the equation $Q_{exp} = Q_{theor}$.
$\Theta_E =$

3. Vaporization heat for liquid nitrogen

A. Experiment

✓ Method (2 – 3 sentences), scheme (if required)	Measurement results:
	✓ Working formula: $r_N =$
	✓ Numerical value: $r_N =$

B. Theory;

C. Comparison of theory with experiment

✓ Theoretical value for evaporation heat (short conclusion, resulting formula): $r_{\text{theor}} =$	Parameters required for calculation r_{theor} :
	✓ Numerical value: $r_{\text{theor}} =$
✓ Comparison of theory with experiment (p. 3C.): $r_N/r_{\text{theor}} =$	

XXVI Международная олимпиада «Туймаада»

Ежегодно в июле в столице Республики Саха (Якутия) — городе Якутск — проходит Международная олимпиада школьников «Туймаада» по физике, математике, информатике и химии. Олимпиаду организует Министерство образования РС (Я), Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова и Малая академия наук РС (Я). В разные годы в олимпиаде принимали участие школьники из Азербайджана, Бельгии, Болгарии, Германии, Казахстана, Китая, Кыргызстана, Мексики, Монголии, Румынии, США, Таиланда, Турции, Франции, Южной Кореи и, конечно, из разных регионов России, включая Москву, Санкт-Петербург, Челябинск и другие города. Также в «Туймааде» регулярно участвуют члены сборной России и призёры заключительного этапа Всероссийских олимпиад. Согласно действующему положению олимпиада по физике включает в себя две лиги: старшую и младшую. В старшей лиге принимают участие учащиеся выпускного и предвыпускного классов, а в младшей — все остальные школьники. Задачи старшей лиги по программе и сложности соответствуют Международной физической олимпиаде, а задачи младшей лиги — 10 классу Всероссийской олимпиады. В каждой лиге проводятся два тура: теоретический и экспериментальный.

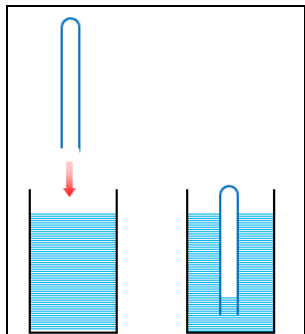
XXVI International olympiad "Tuymaada"

Every year in July in the capital of the Republic of Sakha (Yakutia), the city Yakutsk, the International School Physics, Mathematics, Informatics and Chemistry Olympiad «Tuymaada» takes place. The Olympiad is organized by the Republic Sakha's (Yakutia) Department of Education, North-Eastern Federal University n.a. M.K. Ammosov and Small Academy of Sciences on the base of the physico-mathematical forum «Lensky District». In different years students from Azerbaijan, Belgium, Bulgaria, China, France, Germany, Kazakhstan, Kyrgyzstan, Mexico, Mongolia, Romania, South Korea, Thailand, Turkey, the USA and, of course, from different regions of Russia, including Moscow, Saint-Petersburg, Chelyabinsk and other cities, took part in the Olympiad. Also members of Russian national team and prizewinners of final stage of All-Russian Olympiads regularly participate in «Tuymaada». According to current regulations, Physics Olympiad includes two leagues: senior league and junior league. Students of graduation and pre-graduation classes participate in senior league, all the other school students — in junior one. Senior league problems correspond in program and difficulty to those of International Physics Olympiad, junior league problems — to those of 10th class of All-Russian Olympiad. In each league two rounds are held: theoretical one and experimental one.

Младшая лига

Задача «Давление паров и теплота испарения»

Оценка погрешностей в данной работе не требуется



Если пробирку, которая находится в воздухе, открытым концом погрузить в стакан с жидкостью (смотри рисунок), то после наступления термодинамического равновесия, в пробирке будет находиться двухфазная система (жидкость – газ). При этом газовая фаза будет образована воздухом (смесью газов) и насыщенным паром жидкости.

В данной экспериментальной задаче исследуется эта двухфазная система.

Давление насыщенного пара очень «сильно» зависит от температуры и в достаточно хорошем приближении описывается функцией

$$p = p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (1)$$

Здесь p_0 – давление насыщенных паров при температуре T_0 , L – мольная теплота испарения, которая в некотором интервале температур считается постоянной величиной, R – универсальная газовая константа.

Задание

1. При помощи предложенного оборудования определите относительное давление насыщенных паров жидкости (отношение давление пара жидкости к атмосферному давлению) в интервале высоких температур (60-90°C). Постройте график относительного давления от температуры.
2. Используя теоретическую формулу (1) и экспериментальные данные по давлению насыщенного пара, оцените значение теплоты испарения исследуемой жидкости. Результат представьте в виде удельного и мольного значений.

ANSWER SHEET

First name, last name (write in block letters)

1. Density of liquid nitrogen

Method (2-3 sentences); scheme	Measured parameters:
	Result $\rho =$

4. Speed of evaporation of nitrogen, the dependence $m(t)$

✓ Installation diagram, parameters	✓ $m(t)$ – table (see below)
	✓ $m(t)$ - graph (draw on graph paper)
	✓ Result: $\mu_m = \Delta m_N / \Delta t =$

✓ Table of dependence $m(t)$

where ρ is the air density, c_V is the specific heat capacity of air at a constant volume, ℓ is the mean free path of air molecules, v_T is the speed of thermal motion of molecules.

Write down the working formulas, the results of calculations, estimates and conclusions a) and b) in the answer sheet.

6. Electrical resistance of tungsten at high and low temperatures (5)

To perform the tasks of this item, you may need some characteristics of the halogen incandescent lamp in your equipment with G4 base:

- ✓ Operating lamp voltage: $U = 220 \text{ V}$;
- ✓ Rated lamp power: $W = 35 \text{ W}$;
- ✓ The filament temperature in the operating mode: $T_r \approx 3000 \text{ }^\circ\text{C}$.

It is known that the resistance of metals in a fairly wide range of temperatures varies according to a linear law:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t),$$

where R_0 is the resistance at a temperature of $0 \text{ }^\circ\text{C}$, α is the temperature coefficient of resistance, t is the temperature on the Celsius scale.

- a) Estimate the temperature coefficient of resistance α for tungsten by measuring the resistance $R(t_r)$ of the lamp coil at room temperature and at the temperature of melting ice R_0 .
- b) Extrapolating a linear relationship with the obtained value of α to a high temperature region, find out whether the linear dependence $R(t)$ “works” up to the lamp operating temperature $\sim T_r$.
- c) Extrapolating a linear relationship with the obtained value of α to the region of the low temperatures, find out whether the linear dependence $R(t)$ “works” at the low temperatures (up to the nitrogen temperature $\sim T_N$).

The results of the measurements carried out in a), b), c) and corresponding conclusions should be written on the answer sheet.

Оборудование

Стеклянная пробирка, стеклянный стакан, термометр, линейка, пенопластовая подставка под стакан, пенопластовая крышка с отверстиями для пробирки и термометра, 3 листа миллиметровой бумаги (для построения графиков и изготовления шкалы на пробирке), скотч, небольшие ножницы. Салфетки для поддержания чистоты на рабочем месте. Жидкость прогретая до температуры $90 - 95^\circ\text{C}$ наливается в стакан перед началом измерений по требованию участника олимпиады.

Важное замечание!

Очень аккуратно обращайтесь с оборудованием экспериментальной задачи. Будьте осторожны с горячей жидкостью и не пробуйте её на вкус.

Рекомендуемый ход выполнения задания

1. Используя полоску миллиметровой бумаги и скотч, изготовьте на поверхности пробирки «водонепроницаемую» измерительную шкалу (для измерения высоты столба паровоздушной смеси).
2. Измерьте «внутреннюю» высоту пробирки.
3. Вставьте пробирку закрытым концом в специальное углубление пенопластовой крышки. Пробирка трением должна прочно удерживаться в крышке. Термометр в эту крышку уже должен быть вставлен. Термометр трением должен удерживаться в крышке. Проверьте возможность его перемещения (вверх, вниз). При измерениях термометр должен находиться на уровне середины паровоздушного столба. Проверьте положение крышки с пробиркой и термометром на стакане. Пробирка не должна упираться в дно стакана.

4. Следующий шаг соответствует началу описания данной задачи. В стакан будет налита горячая жидкость. Крышка закроет стакан. При этом пробирка опустится в жидкость, будет прогреваться и насыщаться парами. Через некоторое время наступит термодинамическое равновесие и система начнёт остывать. С этого момента Вы должны одновременно измерять две величины: 1) по шкале пробирки – положение уровня жидкости в пробирке, 2) по шкале термометра – температуру жидкости, которую с достаточной точностью можно считать равной температуре паровоздушной смеси. Вы должны получить экспериментальные значения величин примерно в диапазоне 90 – 30 °С. Основные измерения должны быть в интервале 90 – 60 °С и обязательно 1 – 2 измерения при температуре близкой к комнатной, при которой давлением насыщенных паров можно пренебречь.
5. Если экспериментальная установка и Вы готовы к измерениям, то попросите налить жидкость. Уровень жидкости при погруженной пробирке должен быть максимально высоким.
6. По измеренной координате положения уровня жидкости в пробирке вычисляется высота паровоздушной смеси.
7. Пренебрегая давлением паров при низкой температуре и используя уравнение состояния идеального газа, получите «рабочую» формулу для вычисления по экспериментальным данным относительного давления насыщенных паров исследуемой жидкости.
8. Постройте график экспериментальной зависимости относительного давления пара от температуры (по шкале Кельвина). Дайте объяснение его расхождения (в некоторой области температур) с теоретической формулой (1).

where Θ_E is the characteristic Einstein temperature, which is different for different bodies. The Einstein temperature is usually a few hundred Kelvin. Our work allows us to estimate the Einstein temperature. For this:

- a) Experimentally determine the amount of heat Q_{exp} that a steel nut receives when heated from nitrogen T_N to a temperature T_0 of melting ice;
- b) Using the Einstein heat capacity formula, obtain the theoretical value of Q_{theor} . When calculating, assume that $\exp(\Theta_E/T_N) \gg \exp(\Theta_E/T_0) > 1$;
- c) Choose the value of the Einstein temperature Θ_E , at which the equality $Q_{exp} = Q_{theor}$ holds in the best possible way.

Write down the results of measurements and calculations obtained in a), b) and c) in the answer sheet.

5. Thermal conductivity coefficient of foam (5)

The heat flux through a flat wall with a thickness δ for the stationary case is determined by the Fourier thermal conductivity law:

$$j = -\kappa(\Delta T/\delta),$$

where j is the power density of the heat flux (the heat flux per unit of time through a unit perpendicular area), ΔT is the temperature difference, κ is the thermal conductivity coefficient of the substance (in our case, the foam).

- a) Suggest a method and carry out the measurements necessary to estimate the value of the thermal conductivity coefficient κ of the foam at difference between the room temperature $T_r = \dots$ and nitrogen temperature T_N :

$$|\Delta T| = T_r - T_N;$$

- b) Compare the thermal conductivity coefficient of the foam with the thermal conductivity coefficient of air under room conditions, calculated according to the gas-kinetic formula:

$$\kappa_{\text{воз}} \sim \frac{1}{3} \rho c_v \ell v_T,$$

B. Theory (4)

It is known that the temperature T of the phase transition of the 1st kind (melting and boiling) depends on the external pressure P (recall, for example, that high in the mountains water boils at a significantly lower temperature). This dependence is expressed by the Clapeyron-Clausius formula, which determines the angle of inclination of the tangent at each point of the equilibrium curve of the two phases on the phase (T, P)-diagram (see fig. Phase (T, P)-diagram of nitrogen):

$$dP/dT = q_{12}/T(v_2 - v_1),$$

where q_{12} is the specific heat of the phase transition $1 \rightarrow 2$, v_1 and v_2 are the specific volumes of phases 1 and 2, respectively.

Perform the following theoretical task:

using the Clapeyron-Clausius equation, reference information and the data of the phase (T, P)-diagram of nitrogen, make a theoretical estimate of the value of the specific heat of vaporization r_{theor} for the liquid nitrogen, considering it constant in the temperature range from a triple point to ~ 100 K.

Write down in the answer sheet the working formula for the r_{theor} and its numerical value.

C. Comparison of theory with experiment (1)

Compare the theoretical value of nitrogen evaporation heat with the experimental one. Write down the result of the comparison in the answer sheet in the form of the ratio r_N/r_{theor} . Make a conclusion.

4. Einstein temperature for steel (iron) (6)

If at the room and higher temperatures the heat capacity of a solid body is practically constant, then at the low temperatures there is a strong dependence of the heat capacity on temperature, and, at absolute zero, as is known, the heat capacities of all bodies tend to zero.

According to the Einstein model, which works well in practice, the molar heat capacity temperature dependence of the body can be represented as:

$$C(T) = 3R \left(\frac{\theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\theta_E}{T}}}{(e^{\frac{\theta_E}{T}} - 1)^2}$$

9. Используя формулу (1) получите «рабочую» формулу для вычисления теплоты испарения исследуемой жидкости в области высоких температур (примерно в интервале $60 - 90$ °C) по экспериментальным значениям относительного давления пара.

10. Проведите расчёт теплоты испарения. Представьте результат в виде удельного и мольного значений.

Пример возможного решения

1. Жидкостью в задаче является слабо подкрашенная вода. Поэтому значение теплоты испарения должно согласовываться с её табличным значением.

График зависимости логарифма давления пара воды от «обратной» температуры в интервале $20 - 100$ °C (рис.1).

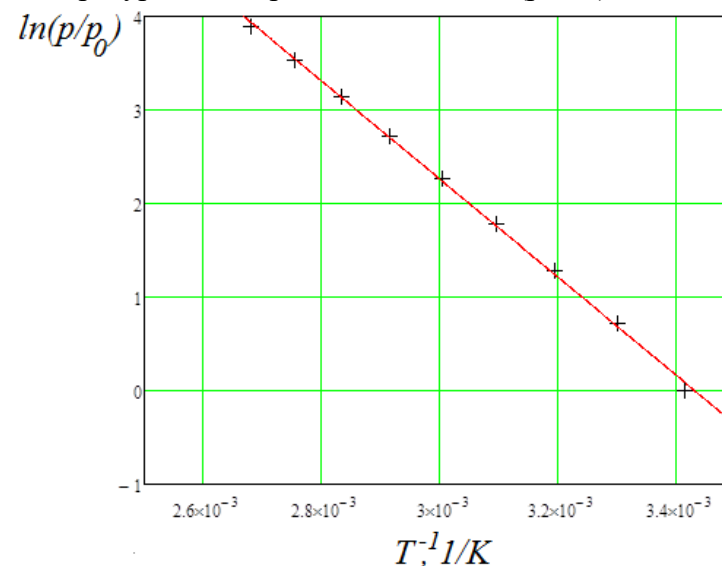


Рис.1

Прямая линия аппроксимации определяет среднюю теплоту испарения $L = 2,42 \cdot 10^6$ Дж/кг. = $4,36 \cdot 10^4$ Дж/моль.

2. Вывод «рабочей» формулы относительного давления.

Записываем два уравнения давления паровоздушной смеси для высокой и низкой температур. При низкой температуре пренебрегаем давлением насыщенных паров:

$$\begin{cases} \frac{m}{\mu \cdot S \cdot h} RT + p = p_A \\ \frac{m}{\mu \cdot S \cdot h_m} RT_m = p_A \end{cases}$$

Здесь m - масса воздуха, μ - молярная масса воздуха, S - внутренняя площадь сечения пробирки, h - высота паровоздушной смеси, p - давление пара, p_A - атмосферное давление, h_m - высота столба паровоздушной смеси при минимальной (экспериментальной) температуре T_m . Из этой системы уравнений получаем «рабочую» формулу относительного давления паров

$$\frac{p}{p_A} = 1 - \frac{T}{T_m} \cdot \frac{h_m}{h} \quad (2)$$

3. Вывод «рабочей» формулы для расчета теплоты испарения.

Для интервала высоких температур записываем две формулы давления

$$\begin{aligned} p &= p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \\ p_{min} &= p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{min}}\right)\right) \end{aligned}$$

Здесь p_{min} - давление пара при минимальной температуре T_{min} интервала. Из этой системы уравнений получаем

$$\frac{p}{p_{min}} = \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

Полученную формулу преобразовываем к «линейному» виду

Tasks

5. Liquid nitrogen density (1)

Find the density ρ_N of liquid nitrogen.

Describe the method; write down the results of measurements and calculations in the answer sheet.

6. Nitrogen evaporation speed (4)

- Pour liquid nitrogen into the thermostat, cover it with a lid and put it on the scale (there must be enough nitrogen so that the scale does not “go off the scale”);
- Explore the dependence $m(t)$ of the mass of the thermostat with nitrogen on time and according to the graph of dependence $m(t)$ determine the average evaporation speed of nitrogen $\mu_m = \Delta m_N / \Delta t$ during the measurement time $t \sim 3-4$ minutes.

The answer sheet should include:

- ✓ An installation diagram;
- ✓ A table of dependence $m(t)$;
- ✓ The graph of $m(t)$;
- ✓ The numerical value μ_m of the average speed of evaporation of nitrogen during the measurement.

7. Heat of vaporization of liquid nitrogen (9)

A. Experiment (4)

Suggest a method and take the necessary measurements to determine the specific heat of vaporization r_N of liquid nitrogen. From the measurement results, calculate r_N .

The answer sheet should include:

- ✓ A description of the measurement procedure;
- ✓ The measurements, which allow determining r_N ;
- ✓ A working formula for calculating r_N ;
- ✓ The numerical value r_N .

Reference data, constants:

Water density: $\rho_0 = 1 \text{ g/cm}^3$;

Specific heat of ice melting: $\lambda_0 = 334 \text{ J/g}$;

The universal gas constant: $R = 8.31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$;

Avogadro's number: $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$;

Molar mass of molecular nitrogen (N_2): $\mu_N = 28 \text{ g/mol}$;

Molar mass of air: $\mu_{\text{air}} = 29 \text{ g/mol}$;

Molar mass of iron: $\mu_{\text{Fe}} = 56 \text{ g/mol}$;

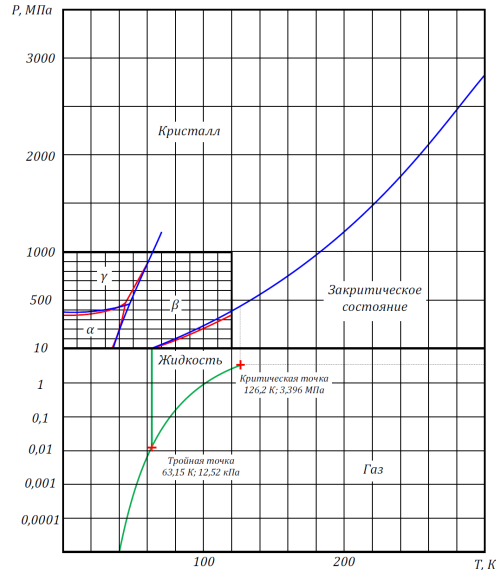
Gas kinetic diameter of air molecules: $d \sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$

The boiling point of liquid nitrogen at normal pressure: $T_N = 77.4 \text{ K}$.

Normal atmospheric pressure: $P_0 = 0.1013 \text{ MPa}$;

The triple point of nitrogen: $T_{\text{tr}} = 63.15 \text{ K}$, $P_{\text{tr}} = 12.53 \text{ kPa}$.

The figure below shows the complete phase (T, P)-diagram of nitrogen:



Phase (T, P) -diagram of nitrogen

You may also need the value of temperature and atmospheric pressure in the audience, in which you are conducting the experiment:

- the atmospheric pressure today $P_r = \dots \text{ mm Hg}$ ($1 \text{ mm Hg} \approx 133 \text{ Pa}$);
- the room temperature $t_r = \dots ^\circ\text{C}$.

$$\ln\left(\frac{p}{p_{\min}}\right) = \frac{L}{RT_{\min}} - \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

Логарифм относительного давления в интервале линейно зависит от обратной температуры. Коэффициент наклона графика равен мольной теплоте испарения (в единицах R).

4. Таблицы экспериментальных данных

Таблица 1. Высота паровоздушного столба и температур

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h, см	15.1	13.4	12.4	11.4	10.4	9.4	8.4	7.4	6.9
T, °C	365.5	363.5	361	359	356	353	349	343.5	339.5

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h, см	6.4	5.9	5.4	5.2	5.1	5	4.9	4.8	4.75
T, °C	335	327.5	319.3	312.5	308.6	306	302	299.7	299

График зависимости $h(T)$ показан на рис.2.

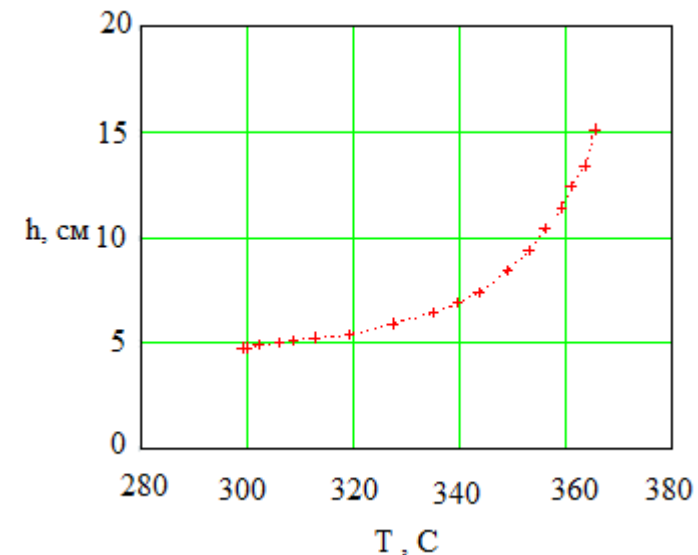


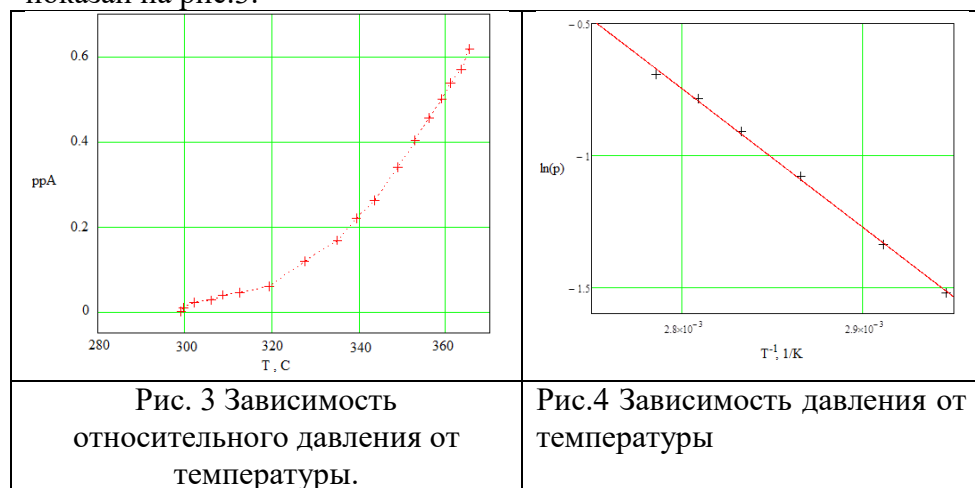
Рис.2 График зависимости $h(T)$.

Таблица 2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ppA	0.615	0.569	0.538	0.5	0.456	0.403	0.34	0.263	0.218

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ppA	0.168	0.118	0.061	0.045	0.039	0.028	0.021	0.0081	0

График зависимости относительного давления от температуры показан на рис.3.



Формула вычисления относительного давления (2) справедлива только при высоких температурах. Поэтому, полученный график не согласовывается с формулой (1) в области малых температур.

5. Расчёт теплоты испарения проводим в интервале температур (86–66,5)°C. В соответствии с формулой (3) строим линейный график (рис.4) в этом интервале.

Коэффициент наклона графика, найденный по методу МНК равен (-5266) и определяет с обратным знаком мольную теплоту испарения в единицах R.

$$L = \frac{5266 \cdot 8,3145}{18 \cdot 10^{-3}} \approx 2,43 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \approx 4,39 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}$$

Эти значения очень хорошо согласуются с табличными значениями.

8. digital stopwatch;
9. multimeter with wires;
10. halogen incandescent lamp with tungsten filament;
11. tripod with holder;
12. jar to drain the used water;
13. plastic spoon;
14. paper towels or napkins;
15. thread;
16. ruler;
17. caliper, scissors (on request);
18. graph paper (2 sheets)

Liquid nitrogen is a cryogenic liquid: at atmospheric pressure, the boiling temperature of liquid nitrogen is $\approx -196^\circ\text{C}$! The nitrogen poured into the foam cup (thermostat) evaporates due to heat exchange with the environment through the walls of the thermostat, and its mass decreases with some speed. If a sample (a nut, a halogen lamp), the initial temperature of which is significantly higher than the temperature of liquid nitrogen, is dropped into the nitrogen for the necessary measurements, a rapid boil will begin, which will continue until the sample is cooled to the nitrogen boiling point. A sign of the completion of the sample cooling process may be a short-term release from the thermostat of some additional portion of gaseous nitrogen. This is due to the disappearance of a gaseous interlayer between the cooling sample and the liquid nitrogen. Do not forget that during and after cooling the sample the nitrogen evaporates also due to the heat supply through the walls of the thermostat.

Warning

Be especially careful while working with liquid nitrogen!

Avoid getting liquid nitrogen on open body areas and clothing!

**Senior league
Problem**

**Properties of liquid nitrogen. Einstein temperature for steel.
Thermal conductivity coefficient of the foam. Electrical resistance of tungsten wire at low and high temperatures**

The main results of this work are evaluative in nature and therefore you do not have to estimate the errors.

In this experimental work, you will explore some of the properties of liquid nitrogen, as well as the behavior of substances at low temperatures.

To do the tasks you may need the following equipment:



1. two glasses made of foamed polystyrene with a heat insulating lid (for water, nitrogen);
2. paper cup;
3. thick-walled foam glass with a lid (thermostat) for liquid nitrogen;
4. water, ice (on request);
5. liquid nitrogen (on request);
6. steel nuts of different mass;
7. electronic scales;

Критерии оценивания для задачи «Давление пара и теплота испарения»

№	Задание	Б
П.1	Определение относительного давления насыщенных паров жидкости в области высоких температур.	10
1.1	Получены экспериментальные значения высоты столба паровоздушной смеси и температуры.	4
1.2	Получена «рабочая» формула $\frac{p}{p_A} = 1 - \frac{T}{T_m} \cdot \frac{h_m}{h}$ для вычисления по экспериментальным данным относительного давления насыщенных паров исследуемой жидкости.	3
1.3	Построен график зависимости относительного давления паров (вычисленного по рабочей формуле) от температуры. Дано объяснение его расхождения в области низких температур с теоретической формулой $p = p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$	3
П.2	Определение теплоты испарения жидкости.	11
2.1	Получена «рабочая» формула определения теплоты испарения по экспериментальной зависимости относительного давления паров от температуры. Определена область температур использования формулы. $\frac{p}{p_{min}} = \exp\left(\frac{L}{R} \left(\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T}\right)\right)$	4
2.2	Формула приведена к линейной форме. $\ln\left(\frac{p}{p_{min}}\right) = \frac{L}{RT_{min}} - \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T}$	2
2.3	Построен график (в линейных координатах)	2
2.4	Определена теплота испарения (по линейному графику). Имеется запись результата в мольном и удельном значениях.	3

Младшая лига

Задача «Деформация и колебания»

Оценка погрешностей в данной работе не требуется.

Упругая пластина, уравновешенная на опоре (Рис. №1), прогибается (деформируется) под собственным весом. Деформация превращает пластину на опоре в «физический маятник», который может совершать колебания.

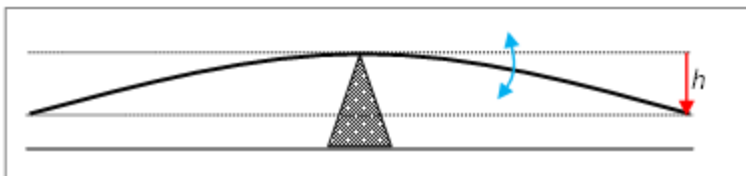


Рис.1 Схема измерения.

В данной работе Вам нужно исследовать зависимость деформации и периода колебаний от длины пластины. Можно показать, что «стрелка» прогиба (величина h при небольших деформациях) и период колебаний T (при небольших амплитудах колебаний) определены формулами вида

$$h(L) = \alpha \cdot L^n,$$

$$T(L) = \beta \cdot L^k,$$

где n и k – целые числа, величины которых следует определить по результатам эксперимента.

Оборудование

Гибкая пластиковая пластина (длина 60 см), лезвие канцелярского ножа (используется в качестве опоры маятника), большая линейка (от 30 см), две малые линейки (10-15 см), два больших канцелярских зажима, два монтажных зажима, секундомер, ножницы, листы миллиметровой бумаги для построения графиков. Лезвие и монтажные зажимы используются для изготовления «точек» опоры.

Criteria of estimation for problem “Deformation and oscillations”

№	Task	points
P. 1	Determination of the value of the power (n) in the dependence of the deformation value on the plate length $h(L) = \alpha \cdot L^n$	10
1.1	The experimental setup has been assembled to measure the dependence of the value of the “arrow” of the deflection on the plate length $h(L) = \alpha \cdot L^n$. Its diagram has been drawn. The method of the measurement of the “arrow” of the deflection h has been described.	1
1.2	The experimental data of the dependence have been obtained (the table of the values of L and h , at least 5 points).	2
1.3	The graph has been plotted in the linear (logarithmic) coordinates. It is possible to select the value of n , with which the graph becomes linear.	2
1.4	The value of n has been determined using the line graph. Rounding to the integer value has been performed.	2
1.5	The theoretical formula of the dependence $h(L)$ has been obtained (the theoretical value of the power n).	3
P. 2	The determination of the value of the power (k) in the dependence on the period of oscillations on the plate length $T(L) = \beta \cdot L^k$.	11
2.1	The measurement method has been described and the experimental dependencies have been obtained (the table of the values of L and T , at least 5 points).	3
2.2	The graph has been plotted in the linear (logarithmic) coordinates. It is possible to select the value of k , with which the graph becomes linear.	2
2.3	The value of k has been determined using the line graph. The rounding to the integer value has been performed.	2
2.4	The theoretical formula of the dependence $T(L)$ has been obtained (the theoretical value of the power k).	4

Oscillations

If energy of small oscillations in the system can be represented in a "quadratic form"

$$E = \alpha \cdot \frac{\dot{x}^2}{2} + \beta \cdot \frac{x^2}{2},$$

then the period of oscillations is determined by the formula

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}}$$

where α and β are the coefficients of inertia and stiffness respectively. For our oscillatory system (the physical pendulum), the energy equation looks like

$$E = J \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + mgl \cdot \frac{\varphi^2}{2}.$$

Here J is the moment of inertia of the plate relative to the point of rotation (oscillations), l is a distance from the point of rotation to the center of mass of the system. Therefore, in our case $\alpha = J$, $\beta = mgl$.

The formula of the oscillation period of the plate $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$.

For the plate with the small bend $J \approx \frac{1}{12}mL^2 = \frac{1}{12}\rho \cdot L^3$. Obviously, that the quantity l is proportional to the value of the deformation h . Using the previously obtained dependence $h(L)$, it is possible to write $l = \gamma \cdot L^4$. Accordingly, for β we obtain the expression

$$\beta = \rho g \gamma \cdot L^5 \sim L^5.$$

After substituting in the formula for the period, we obtain

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m \cdot L^2}{12 \cdot m g \cdot \gamma \cdot L^4}} \sim \frac{1}{L}.$$

The period of oscillations is inversely proportional to the plate length. The value $k = -1$.

Важное замечание!

Будьте очень осторожны с лезвием ножа. Будьте очень аккуратны с пластиковой пластиной. Перед началом эксперимента проверьте её «качество». Пластина должна быть ровной и без заметного начального изгиба.

Ход выполнения работы

1. Из предложенного оборудования соберите экспериментальную установку для одновременного исследования двух зависимостей: $h(L) = \alpha \cdot L^n$, $T(L) = \beta \cdot L^k$ (возможен вариант разделённых исследований). Вариант сборки опоры показан на рисунке 2.



Рис.2

2. Продумайте схему измерения величины деформации пластины h . Для изменения (уменьшения) длины пластины используйте ножницы. Зарисуйте схему установки и опишите ваши действия по измерениям.
3. Проведите необходимые измерения (величина деформации, период колебаний) для различных длин пластины. Экспериментальные данные представьте в виде таблиц.

4. Постройте графики зависимостей $h(L)$ и $T(L)$ в координатах, позволяющих определить величины параметров n и k .
5. Получите теоретические формулы исследуемых зависимостей. Сравните теоретические значения искомых коэффициентов с их экспериментальными значениями.

Вариант возможного решения

1. Фотография и схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.

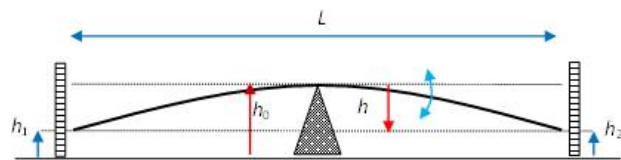


Рис.3 Фотография и схема экспериментальной установки.

Канцелярские зажимы и маленькие линейки используются для измерения координат концов деформированной пластины h_1 , h_2 . h_0 – координата точки опоры. Величина деформации определяется соотношением

$$h = h_0 - \frac{h_1 + h_2}{2}$$

the dependence in the logarithmic coordinates must be linear and the slope must be equal to the parameter k . The experimental graph is fairly well approximated by the linear function. The value of the slope found with the use of the method of least squares is equal to (-0.936) . Which is close enough to (-1) .

Theory Deformation

A rigorous derivation of the equation of the plate deformation under its own weight can be based on a variational method. But, it is possible to prove that $h = \alpha \cdot L^4$ ($n = 4$) from simple physical arguments.

- 1) The “arrow” of the deflection (the deformation) is proportional to a deformation “angle” $h \sim \varphi \cdot L$
- 2) The deformation angle (in accordance with Hooke's law) is proportional to a bending moment and inversely proportional to the coefficient of elasticity (bend) $\varphi \sim \frac{M}{k}$
- 3) The bending moment is proportional to the weight and length of the plate
 $M \sim mg \cdot L = \rho g \cdot L^2$
- 4) The coefficient of elasticity of the entire plate is inversely proportional to its length $k \sim \frac{1}{L}$
- 5) "Collecting" all this together, we obtain $h \sim L^4$. The value $n = 4$.

The exact bending formula for our case is as follows

$h = \frac{\rho g}{128 \cdot k_0} \cdot L^4$. Here ρ is the linear density of the plate, k_0 is the specific coefficient of flexural elasticity of the plate (with a given cross section).

In accordance with the equation $h(L) = \alpha \cdot L^n$

$$\ln(h) = \ln(\alpha) + n \cdot \ln(L)$$

the dependence in the logarithmic coordinates must be linear and a slope must be equal to the parameter n. The experimental graph turned out to be linear. The value of the slope found with the use of the method of least squares is equal to 3.946. Which is close enough to 4.

Table of logarithm T

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
lnT	1.765	1.781	1.813	1.846	1.887	1.923	1.962	2.002	2.041	2.089	2.135

The graph of the dependence T(L) in the logarithmic coordinates (fig.5).

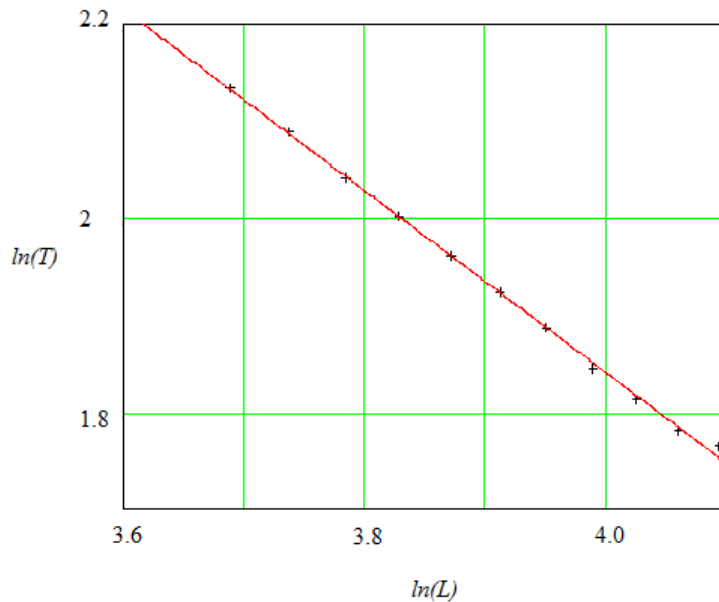


Fig. 4 Graph of dependence T(L) in logarithmic coordinates.

In accordance with the equation $T(L) = \beta \cdot L^n$

$$\ln(T) = \ln(\beta) + k \cdot \ln(L)$$

Экспериментальные таблицы и графики

L =	1			
	60			
	58			
	56			
	54			
	52			
	50			
	48			
	46			
	44			
	42			
	40			
H =	1	27.4	3.6	8.15
	2	26.7	4.7	7.25
	3	25.3	5.1	6.35
	4	24.1	5.4	5.6
	5	23.9	6.3	5.05
	6	23.1	7.55	4.025
	7	22.35	7.95	3.45
	8	21.7	8.45	2.875
	9	20.85	8.45	2.45
	10	20.6	8.9	2.1
	11	20.5	9.7	1.65

Координата точки опоры $h_0 = 11.5$ см.

Таблицы длины пластины (L) и координаты концов пластины (H) (см). Последний столбец таблицы H – величина деформации в см.

Таблицы времени 11 колебаний и периода колебаний (секунды).

t10 =	1	2	3
	19.53	19.52	19.37
	19.85	19.67	19.84
	20.44	20.44	20.41
	21.15	21.1	21.09
	21.99	22.04	21.96
	22.73	22.8	22.9
	23.76	23.73	23.65
	24.72	24.67	24.63
	25.65	25.7	25.65
	26.99	26.86	26.94
	28.23	28.11	28.22
T =	1		
	5.842		
	5.936		
	6.129		
	6.334		
	6.599		
	6.843		
	7.114		
	7.402		
	7.7		
	8.079		
	8.456		

Период колебаний вычислялся по трем измерения 11 колебаний.

Таблицы логарифмов величин L и h.

$\ln(L) =$		1	$\ln(h) =$		1
	1	4.094		1	2.098
	2	4.06		2	1.981
	3	4.025		3	1.848
	4	3.989		4	1.723
	5	3.951		5	1.619
	6	3.912		6	1.393
	7	3.871		7	1.238
	8	3.829		8	1.056
	9	3.784		9	0.896
	10	3.738		10	0.742
	11	3.689		11	0.501

График зависимости $h(L)$ в логарифмических координатах (рис.3).

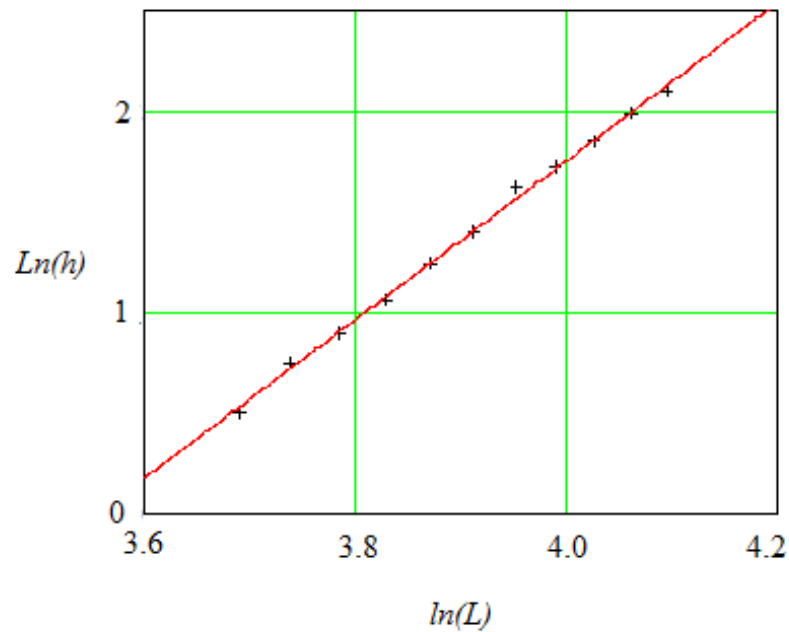


Рис.4 График зависимости $h(L)$ в логарифмических координатах.

Tables of logarithms of L and h.

$\ln(L) =$		1	$\ln(h) =$		1
	1	4.094		1	2.098
	2	4.06		2	1.981
	3	4.025		3	1.848
	4	3.989		4	1.723
	5	3.951		5	1.619
	6	3.912		6	1.393
	7	3.871		7	1.238
	8	3.829		8	1.056
	9	3.784		9	0.896
	10	3.738		10	0.742
	11	3.689		11	0.501

The graph of the dependence $h(L)$ in the logarithmic coordinates (fig.4).

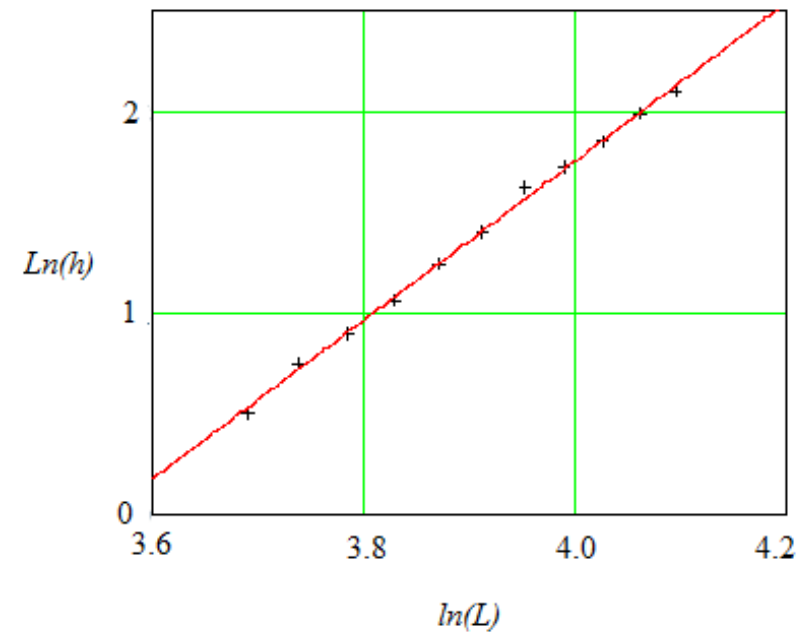


Fig.4 Graph of dependence $h(L)$ in logarithmic coordinates.

Experimental tables and graphs

L =	1	H =	1	2	3
	60		1	27.4	3.6
	58		2	26.7	4.7
	56		3	25.3	5.1
	54		4	24.1	5.4
	52		5	23.9	6.3
	50		6	23.1	7.55
	48		7	22.35	7.95
	46		8	21.7	8.45
	44		9	20.85	8.45
	42		10	20.6	8.9
	40		11	20.5	9.7

The coordinate of the support point $h_0 = 11.5$ cm.
The tables of the plate length (L) and coordinates of the plate ends (H) (cm).
The last column of the table H is the deformation value in cm.

Tables of time of 10 oscillations and period of oscillations (seconds).

t10 =	1	2	3
	19.53	19.52	19.37
	19.85	19.67	19.84
	20.44	20.44	20.41
	21.15	21.1	21.09
	21.99	22.04	21.96
	22.73	22.8	22.9
	23.76	23.73	23.65
	24.72	24.67	24.63
	25.65	25.7	25.65
	26.99	26.86	26.94
	28.23	28.11	28.22

T =	1
	5.842
	5.936
	6.129
	6.334
	6.599
	6.843
	7.114
	7.402
	7.7
	8.079
	8.456

The period of oscillations was calculated on the basis of three measurements of 10 oscillations

В соответствии с уравнением $h(L) = \alpha \cdot L^n$

$$\ln(h) = \ln(\alpha) + n \cdot \ln(L)$$

зависимость в логарифмических координатах должна быть линейной и коэффициент наклона должен быть равен параметру n . Экспериментальный график получился линейным. Значение коэффициента, найденного по методу наименьших квадратов (МНК) равно 3,946, что достаточно близко к 4.

Таблица логарифма T.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
lnT	1.765	1.781	1.813	1.846	1.887	1.923	1.962	2.002	2.041	2.089	2.135

График зависимости T(L) в логарифмических координатах (рис.5).

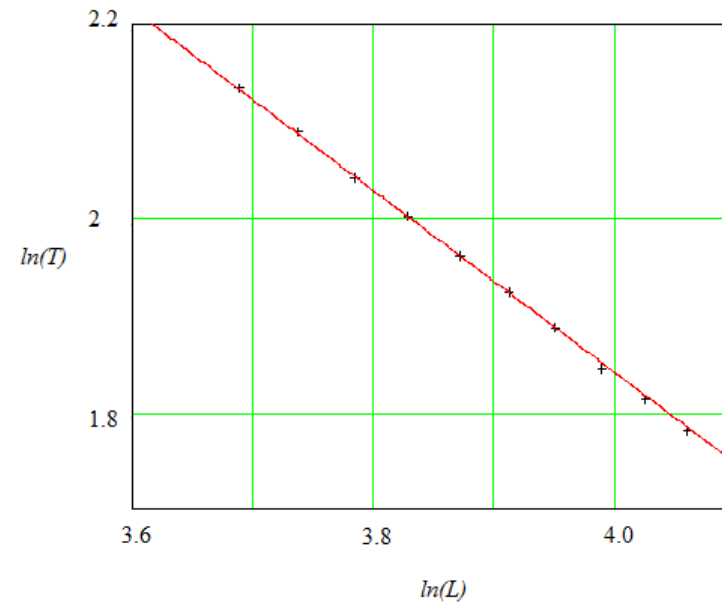


Рис. 5 График зависимости T(L) в логарифмических координатах.

В соответствии с уравнением $T(L) = \beta \cdot L^n$

$$\ln(T) = \ln(\beta) + k \cdot \ln(L)$$

зависимость в логарифмических координатах должна быть линейной и коэффициент наклона графика должен быть равен параметру k . Экспериментальный график достаточно хорошо аппроксимируется линейной функцией. Значение коэффициента наклона, найденного по методу МНК равно $(-0,936)$. Что достаточно близко к значению (-1) .

Теория Деформация

Строгий вывод уравнения деформации пластины под собственным весом может быть основан на вариационном методе. Но, доказать, что $h = \alpha \cdot L^4$ ($n = 4$) можно из простых физических рассуждений.

- 6) Стрелка прогиба (деформации) пропорциональна «углу» деформации $h \sim \varphi \cdot L$
- 7) Угол деформации (в соответствии с законом Гука) пропорционален изгибающему моменту и обратно пропорционален коэффициенту упругости (изгиба) $\varphi \sim \frac{M}{k}$
- 8) Изгибающий момент пропорционален весу и длине пластины $M \sim mg \cdot L = \rho g \cdot L^2$
- 9) Коэффициент упругости всей пластины обратно пропорционален её длине $k \sim \frac{1}{L}$
- 10) «Собирая» все это вместе получаем $h \sim L^4$. Величина $n = 4$.
Точная формула изгиба для нашего случая выглядит следующим образом $h = \frac{\rho g}{128 \cdot k_0} \cdot L^4$. Здесь ρ - линейная плотность пластины, k_0 - удельный коэффициент изгибной упругости пластины (с данным сечением).

Variant of possible solution.

1. A photograph and diagram of experimental setup are shown in figure 3.

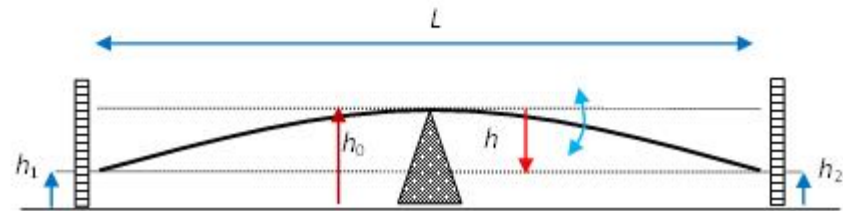


Fig.3. Photograph and diagram of experimental setup.

The stationary clips and small rulers are used to measure the coordinates of the ends of the deformed plate h_1 and h_2 . h_0 is the coordinate of the support point. The deformation value is determined by a ratio

$$h = h_0 - \frac{h_1 + h_2}{2}.$$

Plan of task implementation

1. From the proposed equipment, assemble an experimental setup for a simultaneous study of two dependencies: $h(L) = \alpha \cdot L^n$, $T(L) = \beta \cdot L^k$ (a variant of separate studies is possible). The variant of the support assembly is shown in figure 2.



Fig.2

2. Think through a scheme for measuring the value of the plate deformation h . For a change (a decrease) of the length of the plate, use the scissors. Draw the scheme of the setup and describe your activities for the measurements.
3. Carry out the necessary measurements (the value of the deformation and the period of oscillations) for the various plate lengths. Present experimental data in a form of tables.
4. Plot graphs of dependencies $h(L)$ and $T(L)$ in coordinates, which allow determining the values of the parameters n and k .
5. Obtain the theoretical formulas of the studied dependencies. Compare the theoretical values of the desired coefficients with their experimental values.

Колебания

Если энергия малых колебаний в системе может быть представлена в «квадратичной форме»

$$E = \alpha \cdot \frac{\dot{x}^2}{2} + \beta \cdot \frac{x^2}{2},$$

то период колебаний определяется формулой

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}},$$

где α и β коэффициенты инерционности и жесткости соответственно. Для нашей колебательной системы (физического маятника) уравнение энергии выглядит так

$$E = J \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2} + mgl \cdot \frac{\varphi^2}{2}.$$

Здесь J - момент инерции пластины относительно точки вращения (колебаний), l – расстояние от точки вращения до центра масс системы. Поэтому, в нашем случае $\alpha = J$, $\beta = mgl$. Формула

периода колебаний пластины $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$.

Для пластины с небольшим изгибом $J \approx \frac{1}{12}mL^2 = \frac{1}{12}\rho \cdot L^3$.

Очевидно, что величина l пропорциональна величине деформации h . Используя полученную ранее зависимость $h(L)$, можно записать $l = \gamma \cdot L^4$. Соответственно, для β получаем выражение

$$\beta = \rho g \gamma \cdot L^5 \sim L^5.$$

После подстановки в формулу периода, получаем

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m \cdot L^2}{12 \cdot m g \cdot \gamma \cdot L^4}} \sim \frac{1}{L}.$$

Период колебаний обратно пропорционален длине пластины. Величина $k = -1$.

Критерии оценивания для задачи «Деформация и колебания»

№	задание	баллы
П.1	Определение значения степени (n) в зависимости величины деформации от длины пластины $h(L) = \alpha \cdot L^n$	10
1.1	Собрана экспериментальная установка для измерения зависимости величины «стрелки» прогиба от длины пластины $h(L) = \alpha \cdot L^n$. Нарисована её схема. Описана методика измерения стрелки прогиба h.	1
1.2	Получены экспериментальные данные зависимости (таблица величин L, h, не менее 5 точек).	2
1.3	Построен график в линейных (логарифмических) координатах. Возможен вариант подбора величины n, при которой график становится линейным.	2
1.4	По линейному графику определено значение n. Проведено округление до целого значения.	2
1.5	Получена теоретическая формула зависимости h(L) (теоретическое значение степени n).	3
П.2	Определение значения степени (k) в зависимости периода колебаний от длины пластины $T(L) = \beta \cdot L^k$.	11
2.1	Описан метод измерений и получены экспериментальные данные зависимости (таблица величин L, T, не менее 5 точек).	3
2.2	Построен график в линейных (логарифмических) координатах. Возможен вариант подбора величины k, при которой график становится линейным.	2
2.3	По линейному графику определено значение k. Проведено округление до целого значения.	2
2.4	Получена теоретическая формула зависимости T(L) (теоретическое значение степени k).	4

Junior league

Problem "Deformation and oscillations"

Estimation of errors is not required in this work.

An elastic plate balanced on a support (see figure 1) bends (deforms) under its own weight. Deformation turns the plate on the support into a "physical pendulum", which can oscillate.

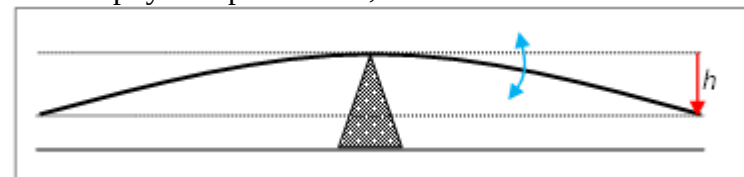


Fig.1

In this work, you need to study a dependence of the deformation and a period of oscillations on a plate length. It can be shown that the "arrow" of deflection (a value of h with small deformations) and the period of oscillations T (with small amplitudes of oscillations) are determined by formulas

$$h(L) = \alpha \cdot L^n,$$

$$T(L) = \beta \cdot L^k,$$

where n and k are integers, the values of which should be determined from results of the experiment.

Equipment

The flexible plastic plate (the length: 60 cm), a stationery knife blade (used as the pendulum support), a large ruler (from 30 cm), two small rulers (10-15 cm), two large stationery clips, two mounting clips, a stopwatch, scissors, graph paper sheets for plotting. The blade and mounting clips are used to make the "point" of the support.

Important note!

Be very careful with the blade of the knife. Be very careful with the plastic plate. Before the beginning of the experiment, check its "quality". The plate should be flat and without noticeable initial bending.

Criteria of estimation for problem “Vapor pressure and heat of vaporization”

№	Task	
P.1	Determination of the relative pressure of the saturated vapors of the liquid in the high temperature range.	10
1.1	The experimental values of the height of the column of the vapor-air mixture and temperature have been obtained.	4
1.2	The “working” formula $\frac{p}{p_A} = 1 - \frac{T}{T_m} \cdot \frac{h_m}{h}$ has been obtained to calculate the relative pressure of the saturated vapors of the studied liquid from the experimental data.	3
1.3	The graph of the dependence of the relative pressure of the vapors (calculated with the use of the working formula) on the temperature has been built. The explanation of its discrepancy in the range of the low temperatures with the theoretical formula $p = p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)$ has been given.	3
P.2	The determination of the heat of vaporization of the liquid.	11
2.1	The “working” formula for determining the heat of vaporization has been obtained from the experimental dependence of the relative pressure of the vapors on the temperature. The temperature range for using the formula has been determined. $\frac{p}{p_{min}} = \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T}\right)\right).$	4
2.2	The formula has been brought to the linear form . $\ln\left(\frac{p}{p_{min}}\right) = \frac{L}{RT_{min}} - \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T}$	2
2.3	The graph has been plotted (in linear coordinates)	2
2.4	The heat of vaporization has been determined (according to the linear graph). There is a record of the result of the molar and specific values.	3

Свойства жидкого азота. Температура Эйнштейна для стали.

Коэффициент теплопроводности пенопласта.

Электросопротивление вольфрамовой проволоки при низкой и высокой температуре

Основные результаты данной работы носят **оценочный** характер и поэтому оценку погрешностей можно не делать

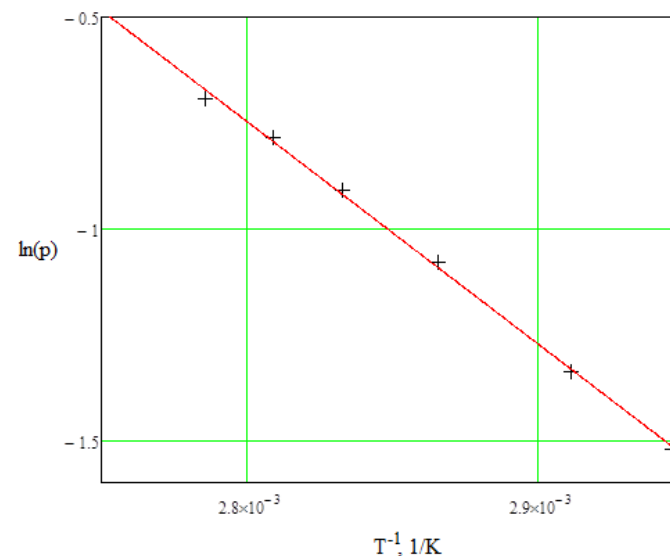
В настоящей экспериментальной работе вам предстоит исследовать некоторые свойства жидкого азота, а также особенности поведения веществ при низких температурах (вплоть до температуры кипения жидкого азота).

Для выполнения работы вам может потребоваться следующее оборудование:



1. два стакана из вспененного полистирола с теплоизолирующей крышкой (для воды, азота);
2. бумажный стакан;
3. толстостенный пенопластовый стакан с крышкой (термостат) для жидкого азота;
4. вода, лёд (по требованию);
5. жидкий азот (по требованию);
6. стальные гайки разной массы;
7. электронные весы;
8. цифровой секундомер;
9. мультиметр с проводами;
10. галогенная лампа накаливания с вольфрамовой нитью;
11. штатив с лапкой;
12. банка для слива использованной воды;
13. пластиковая ложечка;
14. бумажные полотенца или салфетки;
15. нитки;
16. линейка;
17. штангенциркуль, ножницы (по требованию);
18. миллиметровая бумага (2 листа)

Жидкий азот – криогенная жидкость: при атмосферном давлении температура кипения жидкого азота составляет $\approx -196^{\circ}\text{C}$! Азот, налитый в пенопластовый стакан (термостат), испаряется за счет теплообмена с окружающей средой через стенки термостата, и его масса уменьшается с некоторой скоростью. Если для проведения необходимых измерений в азот опустить образец (гайку, галогенную лампу), начальная температура которого существенно выше температуры жидкого азота, то начнется бурное кипение, которое будет продолжаться до тех пор, пока образец не охладится до температуры кипения азота. Признаком завершения процесса охлаждения образца может служить кратковременный выброс из термостата некоторой дополнительной порции газообразного азота. Это связано с исчезновением газообразной прослойки между охлаждающимся образцом и жидким азотом. Не забывайте, что



The slope of the graph found with the use of the method of least squares is equal to (- 5266) and determines with the opposite sign the molar heat of vaporization in the units of R.

$$L = \frac{5266 \cdot 8.3145}{18 \cdot 10^{-3}} \approx 2.43 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{kg}} \approx 4.39 \cdot 10^4 \text{ J/mol}$$

These values are in very good agreement with the table values.

Table of calculation of relative pressure of vapor.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ppA	0.615	0.569	0.538	0.5	0.456	0.403	0.34	0.263	0.218

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ppA	0.168	0.118	0.061	0.045	0.039	0.028	0.021	0.0081	0

Table of calculation of relative pressure of vapor.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ppA	0.615	0.569	0.538	0.5	0.456	0.403	0.34	0.263	0.218

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ppA	0.168	0.118	0.061	0.045	0.039	0.028	0.021	0.0081	0

The graph of the dependence of the relative pressure on the temperature (Fig. 3)

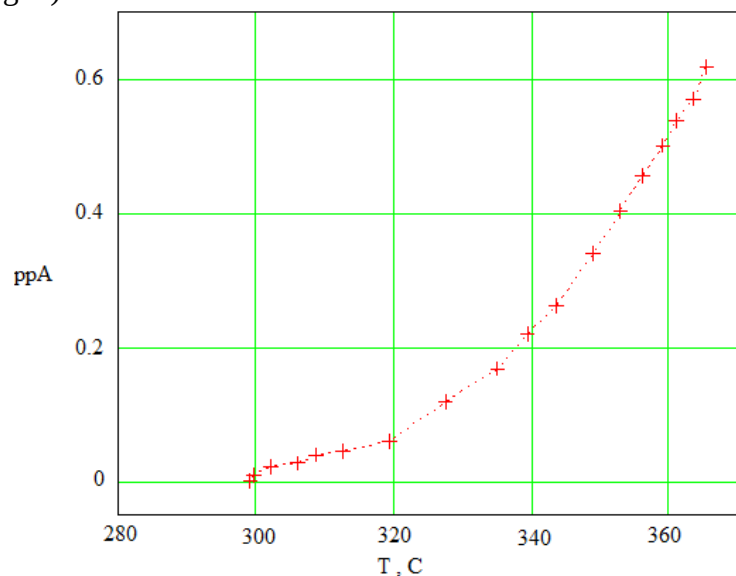


Fig. 3 Graph of dependence of relative pressure on temperature.

The formula for the calculation of the relative pressure (2) is valid only at the high temperatures. Therefore, the obtained graph is not consistent with formula (1) in the range of the low temperatures.

5. The calculation of the heat of vaporization is carried out in the temperature range (86 – 66,5)°C. In accordance with formula (3), we construct the line graph in this range.

во время и после охлаждения образца азот испаряется также за счёт теплоподвода через стенки термостата.

Предостережение

При работе с жидким азотом будьте особенно осторожны!

Избегайте попадания жидкого азота на открытые части тела и одежду!

Справочные данные, константы:

Плотность воды: $\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$;

Удельная теплота плавления льда: $\lambda_0 = 334 \text{ Дж/г}$;

Универсальная газовая постоянная: $R = 8.31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{K}$;

Число Авогадро: $N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$;

Молярная масса молекулярного азота (N_2): $\mu_N = 28 \text{ г/моль}$;

Молярная масса воздуха: $\mu_B = 29 \text{ г/моль}$;

Молярная масса железа: $\mu_B = 56 \text{ г/моль}$;

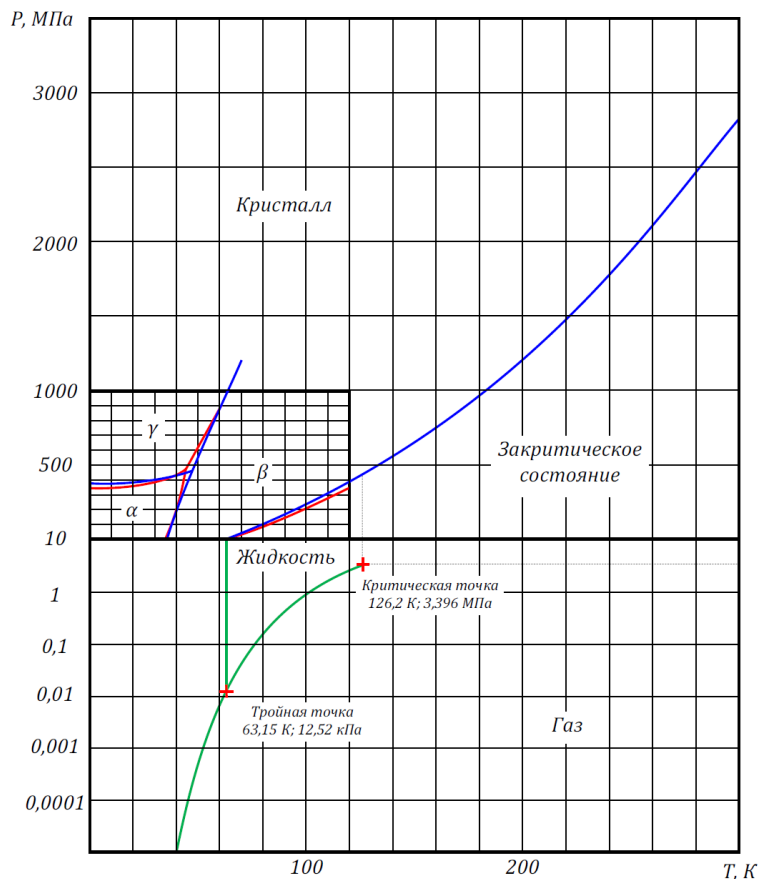
Газокинетический диаметр молекул воздуха: $d \sim 3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$

Температура кипения жидкого азота при нормальном давлении: $T_N = 77,4 \text{ K}$.

Нормальное атмосферное давление: $P_0 = 0.1013 \text{ МПа}$;

Тройная точка азота: $T_{тр} = 63,15 \text{ K}$, $P_{тр} = 12,53 \text{ кПа}$.

На рисунке ниже приведена полная фазовая (Т,Р)-диаграмма азота:



Фазовая (Т,Р)-диаграмма азота

Вам могут потребоваться также значение температуры и атмосферного давления в аудитории, в которой вы проводите эксперимент:

- атмосферное давление сегодня $P_r = \dots$ мм. рт. ст. (1 мм. рт. ст. ≈ 133 Па);
- комнатная температура $t_r = \dots$ °C.

The logarithm of the relative pressure in the interval linearly depends on the inverse temperature. The slope of the graph is equal to the molar heat of vaporization (in units of R).

4. Tables of experimental data

The table of the heights of the vapor-air column and the table of temperatures

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
h, cm	15.1	13.4	12.4	11.4	10.4	9.4	8.4	7.4	6.9
T, °C	365.5	363.5	361	359	356	353	349	343.5	339.5

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
h, cm	6.4	5.9	5.4	5.2	5.1	5	4.9	4.8	4.75
T, °C	335	327.5	319.3	312.5	308.6	306	302	299.7	299

The graph of the dependence $h(T)$ is shown in Fig.2.

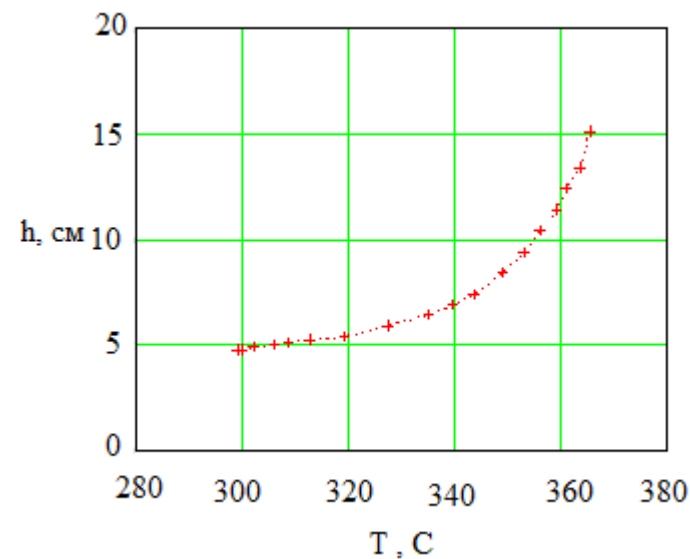


Fig.2 Graph of dependence $h(T)$.

$$\begin{cases} \frac{m}{\mu \cdot S \cdot h} RT + p = p_A \\ \frac{m}{\mu \cdot S \cdot h_m} RT_m = p_A \end{cases}$$

Here m is an air mass, μ is the air molar mass, S is the internal section area of the test tube, h is the height of the vapor-air mixture, p is the vapor pressure, p_A is the atmospheric pressure, h_m is the height of the column of the vapor-air mixture at the minimum (experimental) temperature T_m . From this system of equations we obtain the “working” formula of the relative pressure of the vapors

$$\frac{p}{p_A} = 1 - \frac{T}{T_m} \cdot \frac{h_m}{h} \quad (2)$$

3. The derivation of the “working” formula for calculating the heat of vaporization.

For the interval of the high temperatures, we write two pressure formulas

$$\begin{aligned} p &= p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \\ p_{min} &= p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{min}}\right)\right) \end{aligned}$$

Here p_{min} is the vapor pressure at the minimum temperature T_{min} of the interval. From this system of equations we obtain

$$\frac{p}{p_{min}} = \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_{min}} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

The obtained formula is transformed to the "linear" form.

$$\ln\left(\frac{p}{p_{min}}\right) = \frac{L}{RT_{min}} - \frac{L}{R} \cdot \frac{1}{T} \quad (3)$$

Задание

1. Плотность жидкого азота (1)

Определите плотность ρ_N жидкого азота.

Опишите метод; результаты измерений и расчетов занесите в лист ответов.

2. Скорость испарения азота (4)

- Налейте жидкий азот в термостат, прикройте его крышкой и поставьте на весы (азота должно быть такое количество, чтобы весы не «зашкаливали»);
- Снимите зависимость $m(t)$ массы термостата с азотом от времени и по графику зависимости $m(t)$ определите среднюю скорость испарения азота $\mu_m = \Delta m_N / \Delta t$ за время измерения $t \sim 3-4$ мин.

В листе ответов должны быть:

- ✓ Схема установки;
- ✓ Таблица зависимости $m(t)$;
- ✓ График зависимости $m(t)$;
- ✓ Численное значение μ_m средней скорости испарения азота за время измерения.

3. Теплота парообразования жидкого азота (9)

А. Эксперимент (4)

Предложите методику и проведите необходимые измерения для определения удельной теплоты парообразования r_N жидкого азота. По результатам измерений рассчитайте r_N .

В листе ответов должны быть:

- ✓ Описание методики измерений;
- ✓ Измерения, позволяющие определить r_N ;
- ✓ рабочая формула для расчета r_N ;
- ✓ численное значение r_N .

В. Теория (4)

Известно, что температура T фазового перехода 1-го рода (плавление, кипение) зависит от внешнего давления P (вспомните, например, что высоко в горах вода закипает при существенно более низкой температуре). Эта зависимость выражается формулой Клапейрона-Клаузиуса, которая определяет угол наклона касательной в каждой точке кривой равновесия двух фаз на фазовой (T, P)-диаграмме (см. рис. фазовая (T, P)-диаграмма азота):

$$dP/dT = q_{12}/T(v_2 - v_1),$$

где q_{12} – удельная теплота фазового перехода $1 \rightarrow 2$, v_1 и v_2 – удельные объёмы фаз 1 и 2, соответственно.

Выполните следующее теоретическое задание: с помощью уравнения Клапейрона-Клаузиуса, используя справочные данные и данные фазовой (T, P)-диаграммы азота, сделайте теоретическую оценку величины $r_{\text{тер}}$ удельной теплоты парообразования жидкого азота, считая её константой в интервале температур от тройной точки до ~ 100 K.

В лист ответов занесите рабочую формулу для расчёта $r_{\text{тер}}$ и его численное значение.

С. Сравнение теории с экспериментом (1)

Сравните теоретическое значение теплоты испарения азота с экспериментальным. Результат сравнения отразите в листе ответов в виде отношения $r_N/r_{\text{тер}}$. Сделайте вывод.

4. Температура Эйнштейна для стали (железа) (6)

Если при комнатных и выше температурах теплоёмкость твёрдого тела является величиной практически постоянной, то при низких температурах наблюдается сильная

Example of possible solution.

1. The liquid in the problem is weakly tinted water. Therefore, the value of the heat of vaporization must be consistent with its tabular value.

The graph of the dependence of a logarithm of the water vapor pressure on the “inverse” temperature in the range of 20 - 100 °C (Fig. 1).

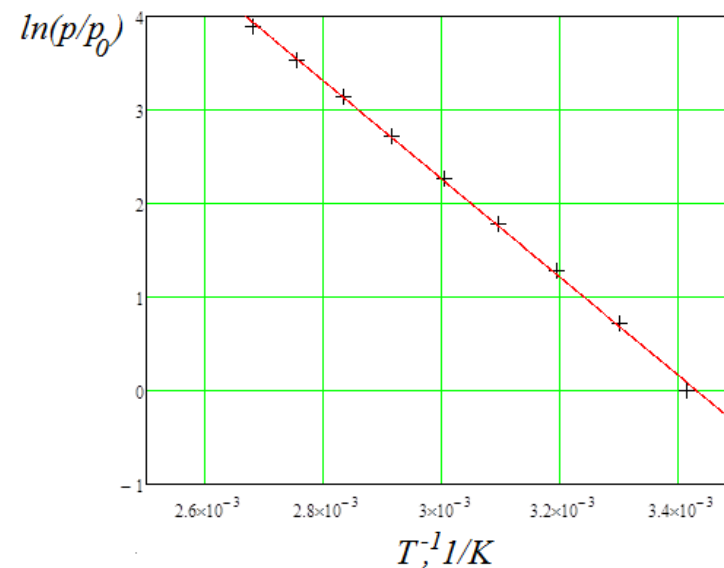


Fig.1

A straight line of the approximation determines the average heat of vaporization $L = 2.42 \cdot 10^6$ J/kg = $4.36 \cdot 10^4$ J/mol.

2. A derivation of the “working” formula of the relative pressure. We write two equations of the pressure the vapor-air mixture for the high and low temperatures. At the low temperature, we neglect the pressure of the saturated vapors.

2) on the scale of the thermometer - the temperature of the liquid, which with sufficient accuracy can be considered as equal to the temperature of the vapor-air mixture. You should get the experimental values of quantities in the range of 90 – 30 °C. The basic measurements should be in the range of 90 – 60 °C and necessarily 1 – 2 measurements at the temperature close to the room temperature, at which the pressure of the saturated vapors can be neglected.

5. If the experimental setup and you are ready to the measurements, then ask to pour the liquid. The level of the liquid with the immersed test tube should be as high as possible.
6. The height of the vapor-air mixture is calculated from a measured coordinate of the position of the level of the liquid in the test tube.
7. Neglecting the vapor pressure at the low temperature and using an equation of state of an ideal gas, obtain a “working” formula for a calculation of the relative pressure of the saturated vapors of the studied liquid from the experimental data.
8. Build the graph of the experimental dependence of the relative pressure of the vapor on the temperature (on the Kelvin scale). Give an explanation of its discrepancy (in a certain temperature range) with theoretical formula (1).
9. Using formula (1), obtain the “working” formula for the calculation of the heat of vaporization of the studied liquid in the range of the high temperatures (approximately in the range of 60–90 °C) from the experimental values of the relative vapor pressure.
10. Calculate the heat of vaporization. Present the result in the form of the specific and molar values.

зависимость теплоёмкости от температуры, причём, при абсолютном нуле, как известно, теплоёмкости всех тел стремятся к нулю. Согласно модели Эйнштейна, хорошо работающей на практике, температурную зависимость молярной теплоёмкости тела можно представить в виде:

$$C(T) = 3R \left(\frac{\Theta_E}{T} \right)^2 \frac{e^{\frac{\Theta_E}{T}}}{\left(e^{\frac{\Theta_E}{T}} - 1 \right)^2},$$

где Θ_E – характеристическая температура Эйнштейна разная для разных тел. Обычно температура Эйнштейна составляет несколько сотен Кельвинов. Наша работа позволяет сделать оценку температуры Эйнштейна. Для этого:

- a) определите экспериментально количество теплоты $Q_{экс}$, которое получает стальная гайка при нагреве от азотной T_N до температуры T_0 таящего льда;
- b) Используя формулу теплоёмкости Эйнштейна, получите теоретическое значение $Q_{теор}$. При расчетах считайте, что $\exp(\Theta_E/T_N) \gg \exp(\Theta_E/T_0) > 1$;
- c) Подберите значение температуры Эйнштейна Θ_E , при котором наилучшим образом выполняется равенство: $Q_{экс} = Q_{теор}$.

Результаты измерений и расчётов, полученных в п.п. а), b), c) занесите в лист ответов.

5. Коэффициент теплопроводности пенопласта (5)

Поток тепла через плоскую стенку толщиной δ для стационарного случая определяется законом теплопроводности Фурье:

$$j = - \alpha (\Delta T / \delta),$$

где j – плотность мощности теплового потока (поток тепла в единицу времени через единичную перпендикулярную площадку), ΔT – перепад температур, α – коэффициент теплопроводности вещества (в нашем случае – пенопласта).

- а) Предложите методику и проведите измерения, необходимые для оценки величины коэффициента теплопроводности α пенопласта при перепаде температур от комнатной $T_r = \dots$ до азотной T_N : $|\Delta T| = T_r - T_N$;
- б) Сравните коэффициент теплопроводности пенопласта с коэффициентом теплопроводности воздуха при комнатных условиях, рассчитанного по газокинетической формуле:

$$\alpha_{\text{воз}} \sim \frac{1}{3} \rho c_v \ell v_T,$$

где ρ – плотность воздуха, c_v – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном объёме, ℓ – длина свободного пробега молекул воздуха, v_T – скорость теплового движения молекул.

Рабочие формулы, результаты расчётов, оценок и выводы п.п. а), б) занесите в лист ответов.

6. Электросопротивление вольфрама при высоких и низких температурах (5)

Для выполнения заданий этого пункта вам могут потребоваться некоторые характеристики имеющейся в вашем оборудовании галогенной лампы накаливания с цоколем G4:

- ✓ Рабочее напряжение лампы: $U = 220$ В;
- ✓ Номинальная мощность лампы: $W = 35$ Вт;
- ✓ Температура нити накала в рабочем режиме: $T_p \approx 3000$ °С.

Equipment

The glass test tube, the glass tumbler, a thermometer, a ruler, a foam mat for the glass tumbler, a foam cover with holes for the test tube and thermometer, 3 sheets of graph paper (for graph plotting and making a scale on the test tube), Scotch tape and small scissors. Napkins to maintain cleanliness at the workplace. The liquid heated to a temperature of 90 – 95 °C is poured into the tumbler before starting measurements at the request of an Olympiad participant.

Important note!

Handle the equipment of the experimental problem very carefully. Be careful with the hot liquid and do not taste it.

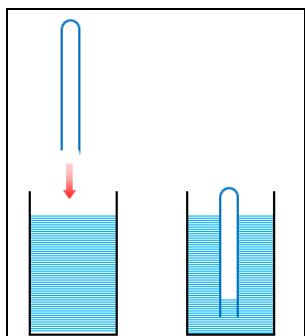
Recommended plan of task implementation

1. Using a strip of the graph paper and Scotch tape, make the “waterproof” measuring scale on a surface of the test tube (to measure a height of a vapor-air mixture column).
2. Measure the “internal” height of the test tube.
3. Insert the test tube by the closed end into the special hole of the foam cover. The test tube must be firmly held in the cover due to friction. The thermometer should already be inserted in the cover. The thermometer must be held in the cover due to the friction. Check a possibility of moving it (up, down). During the measurements, the thermometer should be at a middle level of the vapor-air column. Check a position of the cover with the test tube and thermometer on the tumbler. The test tube should not rest against a bottom of the tumbler.
4. The next step corresponds to the beginning of the description of this problem. The hot liquid will be poured into the tumbler. The cover will close the tumbler. In addition, the test tube will be lowered into the liquid, warm up and be saturated with the vapors. After some time, the thermodynamic equilibrium will be reached and the system will begin to cool. From this moment, you should simultaneously measure two values: 1) on the scale of the test tube - the position of the liquid level in the test tube,

Junior league

Problem “Vapor Pressure and Heat of Vaporization”

Estimation of errors is not required in this work.



If a test tube, which is in air, is immersed by an open end into a glass tumbler with a liquid (see figure), then after a thermodynamic equilibrium is reached, a two-phase system (liquid-gas) will be in the tube. In this case, the gas phase will be formed by the air (a mixture of gases) and saturated vapor of the liquid.

In this experimental problem, this two-phase system is studied.

Pressure of the saturated vapor very “strongly” depends on a temperature and is described in a fairly good approximation by a function

$$p = p_0 \cdot \exp\left(\frac{L}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right) \quad (1)$$

Here p_0 is the saturated vapor pressure at the temperature T_0 , L is the molar heat of vaporization, which in a certain temperature range is considered as a constant, R is the universal gas constant.

Task

1. Using the proposed equipment, determine the relative pressure of the saturated vapors of the liquid (the ratio of the vapor pressure of the liquid to the atmospheric pressure) in the high temperature range (60-90 °C). Plot a graph of the relative pressure versus temperature.
2. Using theoretical formula (1) and experimental data on the saturated vapor pressure, estimate a value of the heat of vaporization of the liquid under study. Represent the result in the form of the specific and molar values.

Известно, что сопротивление металлов в достаточно широком интервале температур изменяется по линейному закону:

$$R(t) = R_0(1 + \alpha t),$$

где R_0 – сопротивление при температуре 0 °C, α – температурный коэффициент сопротивления, t – температура по шкале Цельсия.

- a) Оцените температурный коэффициент сопротивления α вольфрама, измерив сопротивление $R(t_r)$ спирали лампы при комнатной температуре и при температуре тающего льда R_0 .
- b) Экстраполируя линейную зависимость с полученным значением α в область высоких температур, выясните, «работает» ли линейная зависимость $R(t)$ вплоть до рабочей температуры лампы $\sim T_p$.
- c) Экстраполируя линейную зависимость с полученным значением α в область низких температур, выясните, «работает» ли линейная зависимость $R(t)$ при низких температурах (вплоть до азотной температуры $\sim T_N$).

Результаты проведённых в п.п. а), б), с) измерений и соответствующие выводы занесите в лист ответов.

ЛИСТ ОТВЕТОВ

--

Фамилия, имя автора работы (пишете аккуратно печатными буквами)

1. Плотность жидкого азота

Метод (2-3 предложения); схема	Измеренные параметры:
	Результат $\rho =$

2. Скорость испарения азота, зависимость $m(t)$

✓ Схема установки, параметры	✓ $m(t)$ – таблица (см. ниже) ✓ $m(t)$ - график (построить на миллиметровке)
	✓ Результат: $\mu_m = \Delta m_N / \Delta t =$

б) Необходимые измерения, расчеты, графики (на миллиметровке) и вывод о выполнимости линейной зависимости $R(t)$ при высоких температурах $\sim T_p = 3000$ °C:

с) Необходимые измерения, расчеты, графики (на миллиметровке) и вывод о выполнимости линейной зависимости $R(t)$ при низких температурах $\sim T_N \approx 77$ K:

b) Сравнение теплопроводности воздуха и пенопласта Расчёт параметров, необходимых для оценки коэффициента теплопроводности воздуха: - плотность воздуха: $\rho =$ - удельная теплоёмкость: $c_V =$ - длина свободного пробега: $\ell =$ - тепловая скорость: $v_T =$ коэффициент теплопроводности воздуха: $\alpha_{\text{воз}} \sim \frac{1}{3} \rho c_V \ell v_T =$ Результат сравнения, вывод
--

6. Электросопротивление вольфрама при высоких и низких температурах

a) Результаты необходимых измерений и расчёт температурного коэффициента сопротивления вольфрама в интервале от комнатной до температуры тающего льда: температурный коэффициент сопротивления: $\alpha =$

✓ Таблица зависимости $m(t)$

3. Теплота парообразования жидкого азота

А. Эксперимент

✓ Методика (2 – 3 предложения), схема (если требуется)	✓ Результаты измерений:
	✓ Рабочая формула: $r_N =$
	✓ Численное значение: $r_N =$

В. Теория;

С. Сравнение теории с экспериментом

✓ Теоретическое значение теплоты испарения (краткий вывод, результирующая формула):	Параметры, необходимые для расчёта $r_{\text{теор}}$:
$r_{\text{теор}} =$	✓ Численное значение: $r_{\text{теор}} =$
✓ Сравнение теории с экспериментом (п. 3С.): $r_N/r_{\text{теор}} =$	

4. Температура Эйнштейна для стали (железа)

а) количество теплоты $Q_{\text{экс}}$, которое получает стальная гайка при нагреве от азотной T_N до температуры T_0 таящего льда (эксперимент)
- методика эксперимента (1-2 предложения): - рабочая формула: $Q_{\text{экс}} =$ - результаты измерений: - численное значение: $Q_{\text{экс}} =$

б) количество теплоты $Q_{\text{теор}}$, которое получает стальная гайка при нагреве от азотной T_N до температуры T_0 таящего льда (теоретический расчёт по модели Эйнштейна)

- Вывод формулы для $Q_{\text{теор}}$:

$$Q_{\text{теор}}:$$

- Формула для $Q_{\text{теор}}$:

$$Q_{\text{теор}}:$$

с) Численное значение температуры Эйнштейна как результат решения уравнения

$$Q_{\text{экс}} = Q_{\text{теор}}$$

$$\theta_3 =$$

5. Коэффициент теплопроводности пенопласта

а) Эксперимент для определения теплопроводности пенопласта

Метод (2-3 предложения), схема	Измеренные параметры:
	Рабочая формула $\alpha =$
	Численное значение: $\alpha =$