

# Решения

## 10 класс

### 10 класс. Задача 1: “Зависимость температуры кипения от давления”

Известно, что давление, при котором начинается кипение, зависит от абсолютной температуры как

$$P = Ae^{B\left(C-\frac{1}{T}\right)},$$

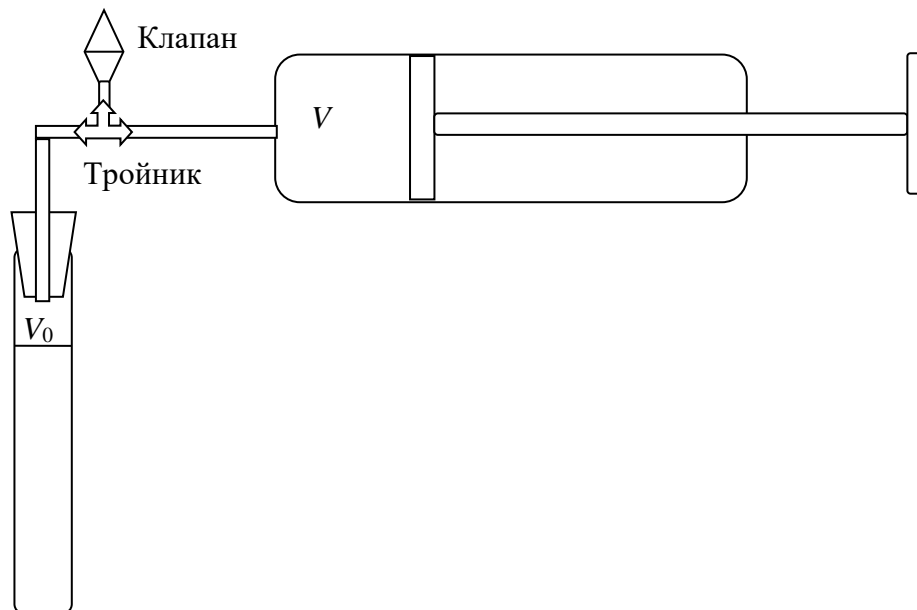
где  $A, B, C$  – постоянные величины.

Определите на основе экспериментальных данных параметры этой зависимости.

**Оборудование:** держатель для пробирки, пробирка, пробка с трубкой, 2 трубки тонкие, тройник-разветвитель, трубка толстая, шприц, салфетки, мультиметр с термопарой, горячая вода по требованию, линейка.

#### Решение.

Соберем установку:



Замерив температуру воды, закупорив пробирку и достаточно быстро оттягивая поршень шприца (чтобы не успело испариться большое количество воды, меняя количество вещества в газопаровом состоянии), будем создавать кипение.

Считая процесс изотермическим (теплоемкость пара мала по сравнению с теплоемкостью воды), давление, при котором жидкость закипает при измеренной температуре, найдем как

$$P = \frac{P_0 V_0}{V + V_0}, \quad (1)$$

где  $V_0$  – объем свободного от воды пространства в пробирке (вообще говоря, включая объем трубок),  $V$  – объем под поршнем шприца.

Проведем замеры требуемого для закипания воды в пробирке объема шприца от температуры воды.

### 1 способ.

Заметим, что количество констант задано избыточно:

$$P = A e^{B\left(C - \frac{1}{T}\right)} = A e^{BC} e^{-\frac{B}{T}} = \tilde{A} e^{-\frac{B}{T}}, \quad (2)$$

где  $\tilde{A} = A e^{BC}$ . Поэтому одну из них мы можем выбрать произвольным образом.

При атмосферном давлении  $P_0 = 101.3$  кПа вода кипит при температуре  $T_0 = 373$  К.

Положим  $A = P_0$ , тогда

$$P = P_0 e^{B\left(C - \frac{1}{T}\right)},$$

$$P_0 = P_0 e^{B\left(C - \frac{1}{T_0}\right)} \Rightarrow C - \frac{1}{T_0} = 0 \Rightarrow C = \frac{1}{T_0}.$$

Отсюда

$$P = P_0 e^{B\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)}. \quad (3)$$

Строим зависимость  $y = \ln \frac{P}{P_0}$  от  $x = \frac{1}{T}$ , константу  $B$  находим как угловой коэффициент этой зависимости.

**2 способ.** Прологарифмируем зависимость (2).

$$\ln P = \ln \tilde{A} - \frac{B}{T} \quad (4)$$

Строя зависимость  $y = \ln P$  от  $x = \frac{1}{T}$ , найдем коэффициенты  $\tilde{A} = A e^{BC}$  и  $B$ .

Отсюда  $A = \tilde{A} e^{-BC}$ . Произвольный выбор одного из параметров  $A$  или  $C$  однозначно определяет второй параметр.

**Комментарий для проверяющих.** Теоретическая зависимость имеет вид

$$P = P_0 \exp\left(\frac{\lambda \mu}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right),$$

где  $P_0$  и  $T_0$  – некоторая опорная точка на фазовом переходе, например, точка кипения воды при атмосферном давлении  $P_0 = 101.3$  кПа,  $T_0 = 373$  К,  $\lambda = 2260$  кДж/кг – удельная теплота парообразования,  $\mu = 18 \cdot 10^{-3}$  кг/моль,  $R = 8.31$  Дж/(моль·К).

При этом  $C = 2.68 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $B = 4895 \text{ K}$ .

### Критерии оценивания

1	Получена формула (1)	1 балл
2	Определены объемы пустой части пробирки + объем трубки	2 балла
3	Проведены замеры давления кипения от температуры кипения	2 балла
4	Построен график зависимости $y = \ln P/(1 \text{ Па})$ или $y = \ln P/P_0$ от $x = 1/T$ Должны быть правильны шкала, масштаб, обозначения осей	3 балла
5	Найдена константа $B$ как угловой коэффициент зависимости	2 балла
6	1. а) найдено значения $\tilde{A}$ или б) получены $A = P_0$ и $C = 1/T_0$	2 балла
7	Отмечено, что произвольный выбор одного из параметров $A$ или $C$ однозначно определяет второй параметр. Если сказано, что $A = P_0$ и $C = 1/T_0$ без обоснования выбора, то эти баллы не ставятся.	2 балла
8	Оценена погрешность	1 балл

## 10 класс. Задача 2: “ Определение емкости двухпроводной линии”

Лабораторный макет представляет собой модель двухпроводной линии. Электростатическое поле в нем моделируется полем плотности тока, растекающегося по проводящей бумаге, структура которого подобна структуре электростатического поля  $\mathbf{j} = \frac{1}{\rho} \mathbf{E}$ , где  $\mathbf{j}$  – плотность тока,  $\rho$  – удельное сопротивление,  $\mathbf{E}$  – напряженность электростатического поля. Макет позволяет определять значение потенциала в выбранной точке.

Если величина линейной плотности заряда на цилиндрах  $\tau = \pm \frac{q}{h}$  (Кл/м), где  $h$  – толщина токопроводящей бумаги, то напряженность электростатического поля в произвольной точке секущей плоскости будет определяться векторной суммой напряженностей полей, создаваемых каждым цилиндром (принцип суперпозиции). Для каждого из цилиндров абсолютная величина напряженности поля

$$E = \frac{2k\tau}{r} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r}.$$

### Задание:

1. Определите и постройте экспериментальные значения напряженности электростатического поля на линии, соединяющей электроды.
2. Выведите и постройте теоретическую зависимость напряженности электростатического поля на линии, соединяющей электроды.
3. Определите погонную емкость двухпроводной линии. Погонная емкость определяется как  $C_n = C/h$ . Для последующей проверки работы запишите диаметры электродов и расстояние между их центрами.

**Оборудование:** Лабораторный макет, линейка

### Решение

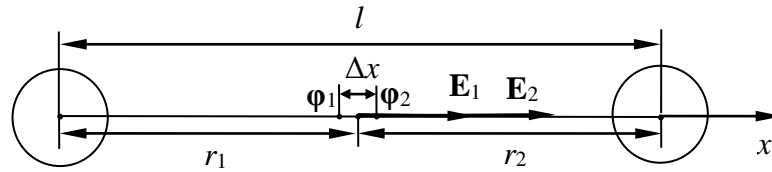
1. Замерим потенциалы на линии, соединяющей электроды, и соответствующие им координаты  $x$  точек с равным шагом по координате. Напряженность поля примерно посередине между соседними точками с измеренными потенциалами найдем как

$$E = -\frac{\Delta\varphi}{\Delta x} = \frac{\varphi_i - \varphi_{i+1}}{\Delta x}. \quad (1)$$

2. Результирующую напряженность электрического поля можно определить по формуле

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{\mathbf{r}_1}{r_1^2} - \frac{\mathbf{r}_2}{r_2^2} \right),$$

где  $r_1$  и  $r_2$  – расстояния до осей цилиндров (см. рис.).



На линии, соединяющей электроды,

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r_1} - \frac{-\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon r_2} = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0\epsilon} \left( \frac{1}{x} + \frac{1}{l-x} \right). \quad (2)$$

Отсюда

$$\tau = 2\pi\epsilon_0\epsilon E \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = 2\pi\epsilon_0\epsilon E \frac{x(l-x)}{l}. \quad (3)$$

Для повышения точности вычислим  $\tau$  по нескольким точкам и усредним.

По найденному  $\tau$  строим  $E(x)$  на основе (2).

### 3. Нахождение погонной емкости

$$C_n = \frac{C}{h} = \frac{q}{Uh} = \frac{\tau}{U}, \quad (4)$$

где  $U$  – напряжение между электродами.

#### Критерии оценивания:

- |  |         |
|--|---------|
| 1. Измерены потенциалы и их координаты $\varphi(x)$ , данные сведены в таблицу | 2 балла |
| 2. Записана формула (1)  | 1 балл  |
| 3. Получена формула (2)  | 1 балл  |
| 4. Получена формула (3)  | 2 балла |
| 5. Определено верное значение $\tau$   | 2 балла |
| если по одной – двум точкам  | 1 балл  |
| если по 3 и более точкам с усреднением   | 2 балла |
| 6. Построен верный график $E(x)$ и экспериментальные точки                     | 2 балла |
| 7. Получена формула (4)  | 2 балла |
| 8. Вычислена емкость, значение попадает в диапазон                             | 2 балла |
| (при проверке учесть, что $C$ разные на разных установках)                     |         |
| 9. Оценена погрешность   | 1 балл  |