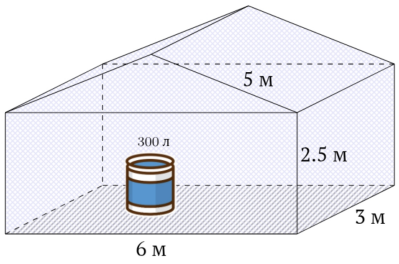
# Энергоэффективная теплица

## Введение

Садовод построил симметричную теплицу из поликарбоната у себя на дачном участке (см. рис. 1). Для продления сезона он использует емкость с водой объема $V = 300$ л. Днем вода нагревается солнцем, а ночью охлаждается, отдавая тепло теплице. Однако, при сильных морозах этого аккумулятора тепла недостаточно, поэтому садовод планирует установить электрический нагреватель в виде резистора – длинной нихромовой проволоки. Нагреватель будет питаться от источника постоянного напряжения $U$.




Ниже приведена таблица с параметрами системы, которые вы можете считать известными в течение всей задачи.

| Параметр | Величина |
|---|---|
| Плотность воды | $\rho_{\text{в}} = 1000\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ |
| Удельная теплоемкость воды | $c_{\text{в}} = 4200\ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot{}^\circ\text{C}}$ |
| Длина теплицы | $L = 6.0$ м |
| Ширина теплицы | $W = 3.0$ м |
| Высота теплицы | $H = 2.5$ м |
| Длина ската крыши | $l = 5.0$ м |
| Коэффициент теплопередачи поликарбоната | $k = 0.35\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot{}^\circ\text{C}}$ |
| Минимально допустимая температура в теплице | $T_{\min} = 5\ ^\circ$C |
| Объем воды в емкости | $V = 300$ л |
| Продолжительность ночи | $t_{\text{N}} = 10$ ч |

Коэффициентом теплопередачи называется коэффициент пропорциональности в законе Ньютона — Рихмана:

$$P = kS\Delta T,$$

где $P$ – мощность теплопередачи, $\Delta T$ – разность температур, $S$ – площадь контакта. Во всех пунктах задачи, необходимо найти численное значение искомой величины, а также выразить формулу для нее, используя **только введенные авторские обозначения**, если не сказано иное. **Во всех пунктах данной задачи потерями тепла на излучение, а также теплоемкостью воздуха пренебречь!**

## Часть А. Тепловой анализ теплицы (1.5 балла)

В данной части считайте температуру воздуха на улице ночью постоянной и равной $T_{\text{out}} = -10\ ^\circ$C, а температуру, до которой нагревается теплица (включая воду) днем $T_{\text{in}} = 15\ ^\circ$C.

**A1** Найдите общую площадь поверхности теплицы $S$, участвующую в теплообмене с окружающей средой, если известно, что через пол теплицы теплообмена не происходит. **0.3**

Во всех пунктах далее можете использовать величину $S$ в формульных ответах, не подставляя вместо нее формулу из **A1**. Во всех дальнейших пунктах пол теплицы также является теплонепроницаемым!

**A2** Определите мощность тепловых потерь $P_{\text{пот}}$ теплицы при разности температур внутри и снаружи $\Delta T = 15\ ^\circ\text{C} = T_{\text{min}} - T_{\text{out}}$. **0.3**

**A3** Какое количество теплоты $Q_{\text{пот}}$ теплица потеряет за ночь, если считать мощность потерь постоянной? Разность температур $\Delta T$ такая же, как и в пункте **A2**. **0.3**

В пункте **A3** вы получили нижнюю оценку на истинную величину потерянного теплицей количества теплоты, так как температура внутри теплицы $T_{\text{внутри}} \geq T_{\text{min}} = 5\ ^\circ\text{C}$.

**A4** Какое количество теплоты $Q_{\text{н}}$ отдаст теплице вода при ее остывании от $T_{\text{in}}$ до $T_{\text{min}}$? **0.3**

**A5** Найдите величину $\Delta Q = Q_{\text{пот}} - Q_{\text{н}}$, являющейся нижней оценкой количества теплоты, которое должен восполнить электрический нагреватель для поддержания теплицы в установившемся режиме. **0.3**

В дальнейших частях задачи можете считать известными данные параметры:

| Параметр | Величина |
|---|---|
| Напряжение батареи аккумулятора | $U = 250$ В |
| Удельное сопротивление проволоки при $0\ ^\circ$C | $\rho_0 = 1.1 \cdot 10^{-6}$ Ом · м |
| Длина проволоки | $\lambda = 150$ м |
| Радиус проволоки | $r = 1.0$ мм |
| Температурный коэффициент сопротивления нихрома | $\alpha = 2 \cdot 10^{-4}\ ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| Коэффициент теплопередачи нихрома | $k_{\text{N}} = 3.0\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$ |

Температурным коэффициентом сопротивления (в науке – TCR) называется коэффициент $\alpha$, отражающий связь изменения удельного сопротивления с изменением температуры:

$$\rho(T) = \rho_0(1 + \alpha \cdot T),$$

где $T$ измеряется в $^\circ$C.

## Часть B. Электрический нагреватель (7.9 баллов)

В пунктах **B1-B2** считайте температуру воздуха внутри теплицы постоянной и равной $T_{\text{in}} = 20\ ^\circ\text{C}$.

**B1** Запишите уравнение теплового баланса для проволоки при подключении ее к источнику постоянного напряжения $U$. Помимо параметров, данных ранее, можете использовать величину температуры $T$ проволоки. **0.8**

**B2** Определите температуру $T$ нихромовой проволоки в рабочем режиме. **1.2**

Садовода беспокоит, что при резком изменении $T_{\text{out}}$, установившаяся температура в теплице $T_{\text{in}}$ будет резко изменяться, что отрицательно сказывается на растительности в теплице. Садовод придумал как избежать данной проблемы: он подключает последовательно с нихромовой проволокой автоматизированный переменный резистор, который способен менять свое сопротивление при изменении внешней температуры так, чтобы температура в теплице поддерживалась постоянной. Данный переменный резистор выводится на улицу, поэтому не греет содержимое теплицы.

**Во всех следующих пунктах температура воздуха в теплице $T_{\text{in}} = 20\ ^\circ\text{C} = \text{const}$!**

| | | |
|---|---|---|
| **B3** | Запишите систему уравнений, из которой можно найти зависимость $r_{\text{пер}}$ от $T_{\text{out}}$. | **1.5** |

| | | |
|---|---|---|
| **B4** | Из уравнений, записанных в пункте **B3**, найдите выражение для $r_{\text{пер}}$ через $T_{\text{out}}$. | **1.5** |

| | | |
|---|---|---|
| **B5** | Постройте на ноутбуке график зависимости, получившейся в пункте **B4**. Загрузите скриншот этого графика. | **1.5** |

| | | |
|---|---|---|
| **B6** | Запишите дополнительно $r_{\text{крит}}$ при $T_{\text{out}} = 0\ ^\circ\text{C}$. | **0.2** |

| | | |
|---|---|---|
| **B7** | Запишите **численное** значение минимальной температуры на улице $T_{\text{крит}}$, при которой такой метод позволяет поддерживать температуру $T_{\text{in}} = 20\ ^\circ\text{C}$. | **0.2** |

| | | |
|---|---|---|
| **B8** | Найдите **численное** значение КПД данной схемы $\eta$ при $T_{\text{out}} = -10\ ^\circ\text{C}$. | **1.0** |

## Часть C. Траты на электричество (0.6 балла)

При помощи метода из части B можно регулировать количество теплоты, получаемое теплицей, однако, тратятся лишние мощности на бесполезный нагрев переменного резистора, из-за чего садовод **переплачивает** сумму $M$ ежедневно.

| | | |
|---|---|---|
| **C1** | Найдите **численное** значение $M$ при температуре $T_{\text{out}} = -10^\circ\text{C}$, если известно, что стоимость электроэнергии для садовода составляет $n = 2\ \frac{\text{руб}}{\text{МДж}}$. | **0.6** |