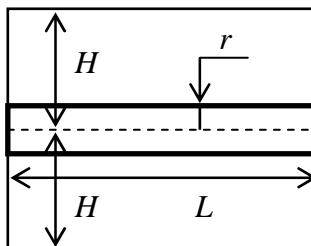


## Задание 2. «Труба дело»

*Ввиду громоздких выражений, встречающихся при решении этой задачи, рекомендуется производить промежуточные численные расчеты.*

Во время холодной морозной зимы (какие теперь случаются редко) почва промерзла на глубину  $2H = 2,0\text{ м}$ . На глубине  $H = 1,0\text{ м}$  лежит медная труба длиной  $L = 100\text{ м}$ , радиусом  $r = 0,20\text{ м}$  и толщиной стенок  $h = 5,0\text{ мм}$ , по которой обычно протекает холодная вода. Но зима оказалась очень морозной и вода в трубе замерзла. Температура льда в трубе и промерзшей почвы равна  $T_0 = -10^\circ\text{C}$ . Для восстановления водоснабжения было решено отогреть трубу электрическим током. Для этого между ее концами подключили источник постоянного напряжения  $U = 220\text{ В}$ .



1. Пренебрегая потерями теплоты в окружающую среду, найдите время  $\tau_1$ , за которое весь лед в трубе растает. Плотность льда  $\rho_{\text{л}} = 900\text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость  $c_{\text{л}} = 2100\text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ , удельная теплота плавления  $\lambda_{\text{л}} = 330\text{ кДж/кг}$ . Теплоемкостью трубы можно пренебречь. Удельное сопротивление меди  $\gamma_{\text{м}} = 1,7 \cdot 10^{-8}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Считайте, что вода в трубе электрический ток не проводит.

2. Вокруг трубы – холодная почва, которая состоит на  $\beta = 0,10$  по объему из льда и на  $1 - \beta = 0,90$  по объему из песка. Часть  $\alpha = 0,50$  тепловой мощности, выделяющейся в трубе, тратится на нагрев окружающей почвы и плавление содержащегося в ней льда. Считайте теплопроводность мерзлой почвы намного меньшей теплопроводности оттаявшей почвы.

За какое время  $\tau_2$  растает весь лед в трубе? Как зависит от времени  $t$  радиус цилиндра  $x$ , в пределах которого оттаяла почва? Постройте примерный график зависимости  $x(t)$ .

Плотность песка равна  $\rho_{\text{п}} = 2500\text{ кг/м}^3$ , удельная теплоемкость песка  $c_{\text{п}} = 840\text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$ .

3. Замерзшая почва не проводит электрический ток, но как только почва оттаивает, она становится неплохим проводником с удельным сопротивлением  $\gamma_{\text{п}} = 2,0 \cdot 10^{-4}\text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Как зависит сопротивление  $R_{\text{п}}$  оттаявшей почвы от времени  $t$ ?

Будем считать, что теплота, выделяющаяся в почве, идет только на нагрев самой почвы (не на трубу). Найдите дополнительное количество теплоты (помимо того, которое выделялось в трубе), выделившееся в почве за время  $t$ , после включения источника напряжения. Считайте, что вода в трубе электрический ток не проводит.

4. Если почва оттаивает до нижней границы «мерзлоты» на глубине  $2H$ , происходит «заземление» и электрический ток перестает течь по трубе. Определите максимальный радиус трубы  $r_{\text{max}}$ , которую еще можно отогреть «электрическим методом». За какое время  $\tau_3$  это произойдет?