

Условие

Задача 9.3 Большая теплая задача про тепловые большие механизмы.

По сообщению Министерства энергетики Республики Беларусь ежегодно в стране производится **36 млн. Гкал** тепловой энергии. Эту энергию мало произвести – ее еще надо доставить потребителю – например, Вам, для обогрева квартиры! В данной задаче необходимо провести некоторые расчеты, связанные с производством и передачей тепловой энергии, а также рассмотреть альтернативные возможности ее передачи. Во всех пунктах задач обязательно приведите расчетные формулы, а затем результаты численных расчетов. **Обратите внимание – в конце задачи приведены необходимые справочные данные!**

Часть 1. Что мы имеем?

Традиционно производство тепловой энергии осуществляется посредством нагревания воды при сжигании топлива и ее последующей транспортировки по теплотрассам к потребителю.

1.1 Рассчитайте сколь тонн воды, которую необходимо нагреть от температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$ до температуры $t_1 = 90^\circ\text{C}$, чтобы произвести всю тепловую энергию за год в нашей стране.

1.2. Сколько тонн нефти необходимо сжечь, что бы произвести это количество тепловой энергии? Считайте, что КПД нагревательной установки составляет $\eta = 80\%$.

1.3. Допустим, что вся нагретая вода поставляется по трубам, причем средняя скорость течения воды в трубе составляет $v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Какую работу должны совершить насосы, что разогнать всю нагретую в республике горячую воду до этой скорости? Вязким трением воды в трубах пренебрегайте.

1.4. Сколько нефти необходимо дополнительно сжечь, что обеспечить работу всех насосных станций? КПД насоса примите равным $\eta = 40\%$.

1.5. Чему равна стоимость (в долларах США) всей этой нефти (и на нагрев воды, и на работу насосных станций)? Среднюю стоимость нефти примите равной 150 долларов/баррель.

1.6. Оцените площадь поперечного сечения всех труб теплотрасс, по которым горячая вода поставляется потребителю?

Часть 2 Можно ли сэкономить?

В данной части задачи мы мысленно переместимся в исследовательскую лабораторию, чтобы от громадных чисел республиканских масштабов перейти к более скромным и осязаемым величинам.

Вы знаете, что теплоперенос может осуществляться различными способами, в том числе без переноса массы. Вам необходимо провести сравнительный анализ этих способов.

2.1 Рассмотрим традиционный способ передачи теплоты – посредством перекачки горячей воды. Пусть горячая вода ($t_1 = 90^\circ\text{C}$) перекачивается из котла нагревателя по трубе диаметром $d = 5,0\text{ см}$ и длиной $l = 10\text{ м}$ со скоростью $v = 10 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ к холодильнику, где остывает до температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Считайте, что потерями теплоты при движении жидкости по трубе можно пренебречь. Найдите поток теплоты, переносимой в этих условиях.

2.2 Теплоперенос может осуществляться посредством теплопередачи по неподвижному стержню. Для исследования этого способа передачи создана следующая установка. Медный стержень диаметром $d = 5,0\text{ см}$ и длиной $l = 10\text{ м}$ одним концом соединен с нагревателем, поддерживающим постоянную температуру $t_1 = 90^\circ\text{C}$, а вторым с холодильником, поддерживающим постоянную температуру $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Боковая поверхность стержня теплоизолирована.

2.2.1. При каком распределении температуры вдоль стержня поток теплоты по нему будет постоянным? Запишите формулу, описывающую зависимость температуры стержня от расстояния до его горячего конца.

2.2.2 Какое количество теплоты потребуется, что нагреть стержень, до такого распределения температур, при котором поток теплоты по нему будет постоянным?

2.2.3 Найдите поток теплоты по стержню в установившемся режиме теплопередачи (т.е. когда этот поток постоянен).

2.3 В природе теплоперенос в больших масштабах осуществляется посредством испарения и конденсации воды. Попробуйте оценить возможности такого способа теплопередачи.

Пусть в теплоизолированную трубу диаметром $d = 5,0$ см и длиной $l = 10$ м поступает водяной пар при температуре $t_1 = 90^\circ\text{C}$, движется по ней со средней скоростью $v = 50 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ и конденсируется на другом конце трубы. Найдите поток теплоты, переносимой паром в этой установке. Считайте, что сконденсировавшаяся вода остывает до температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$.

Справочные материалы.

Гкал – гигакалория; - приставка Гига- означает 10^9 . - калория единица теплоты (или тепловой энергии), $1 \text{ кал} = 4,21 \text{ Дж}$. Удельная теплота сгорания нефти - $q = 4,0 \cdot 10^7 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Плотность воды $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Плотность водяного пара (при условиях, рассматриваемых в данной задаче) считать равной $\rho = 0,70 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Плотность меди - $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Удельная теплоемкость воды $c = 4,2 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

Удельная теплоемкость меди $c = 0,39 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

Удельная теплота испарения воды $L = 2,25 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$.

1 нефтяной баррель равен 158,988 литров.

Стандартная плотность нефти марки Urals (в основном поставляемой в Республику Беларусь) принимается равной $\rho = 0,864 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

Поток теплоты – количество теплоты, переносимой в единицу времени $q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau}$, где ΔQ - количество перенесенной теплоты за промежуток времени $\Delta \tau$.

Если разность температур концов однородного теплоизолированного стержня длиной l равна Δt , тогда в единицу времени через площадку единичной площади поперечного сечения в единицу времени протекает количество теплоты, равное

$$q = \lambda \frac{\Delta t}{l}. \quad (1)$$

где λ - коэффициент теплопроводности – величина, зависящая от материала, из которого изготовлен стержень.

Коэффициент теплопроводности меди $\lambda = 390 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$.



Решение

Задача 9.3 Большая теплая задача про тепловые большие механизмы.

Часть 1. Что мы имеем?

1.1 Расчет массы m_1 нагреваемой воды производим по известной формуле для теплообмена

$$Q_0 = cm_1(t_1 - t_0) \Rightarrow m_1 = \frac{Q_0}{c(t_1 - t_0)} = \frac{3,6 \cdot 10^{16} \cdot 4,21}{4,21 \cdot 10^3 \cdot (90 - 20)} \text{ кг} = 5,1 \cdot 10^{11} \text{ кг} = 5,1 \cdot 10^8 \text{ т},$$

где $Q_0 = 3,6 \cdot 10^{16}$ кал = $1,5 \cdot 10^{17}$ Дж – количество теплоты (энергии), произведенное в нашей стране за год.

1.2 Для производства этого же количества энергии Q_0 необходимо сжечь массу нефти m_2 . С учетом КПД нагревательной установки имеем

$$Q_0 = qm_2\eta \Rightarrow m_2 = \frac{Q_0}{q\eta} = \frac{3,6 \cdot 10^{16} \cdot 4,21}{4,0 \cdot 10^7 \cdot 0,80} \text{ кг} = 4,7 \cdot 10^9 \text{ кг} = 4,7 \cdot 10^6 \text{ т}.$$

1.3 При разгоне нагретой воды насосы совершают работу A по увеличению кинетической энергии воды, следовательно (работой сил вязкого трения воды в трубах пренебрегаем)

$$A = \frac{m_1 v^2}{2} = \frac{5,1 \cdot 10^{11} \cdot (10)^2}{2} \text{ Дж} = 2,6 \cdot 10^{13} \text{ Дж}.$$

1.4 С учетом результата, полученного в пункте 1.3, найдем массу нефти, которую (с учетом коэффициента полезного действия) необходимо дополнительно сжечь для обеспечения работы насосных станций

$$qm_3\eta = A \Rightarrow m_3 = \frac{A}{q\eta} = \frac{2,6 \cdot 10^{13}}{4,0 \cdot 10^7 \cdot 0,40} \text{ кг} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ кг} = 1,6 \cdot 10^3 \text{ т}.$$

1.5 Суммарная стоимость всей нефти (и на нагрев воды, и на работу насосных станций), если ее объем выразить в баррелях (b) будет равна

$$C = c_0 \cdot b = 150 \cdot \frac{m_2 + m_3}{\rho} \cdot \frac{1}{V_0} = 150 \frac{(4,7 \cdot 10^9 + 1,6 \cdot 10^6)}{0,864 \cdot 10^3} \cdot \frac{1}{159 \cdot 10^{-3}} \text{ долларов} =$$

= $5,1 \cdot 10^9$ долларов = 5,1 млрд. долл.

где $c_0 = 150 \text{ USD/баррель}$.

1.6 Пусть горячая вода массой m_1 проходит к потребителю по трубам (за год $t = 365 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ с} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ с}$) со скоростью v , тогда

$$m_1 = \rho v S t \Rightarrow S = \frac{m_1}{\rho v t} = \frac{5,1 \cdot 10^{11}}{1,0 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600} \text{ м}^2 = 1,6 \text{ м}^2.$$

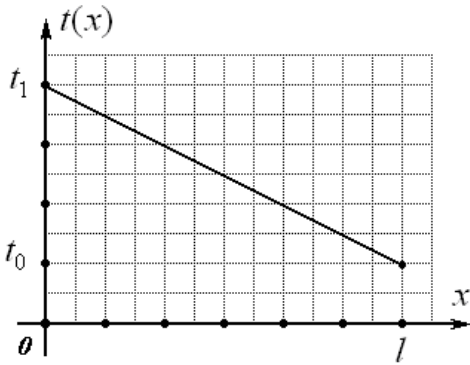
Часть 2. Можно ли экономить?

2.1 Поток теплоты при перекачке воды «традиционным» способом по трубам считаем по определению

$$q = \frac{cm\Delta t}{\Delta \tau} = \frac{c\rho v S \Delta t \Delta \tau}{\Delta \tau} = c\rho v S \Delta t = 4,2 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 3,14 \cdot (2,5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 70 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 5,8 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

2.2.1 Согласно формуле (1), приведенной в справочных материалах, для обеспечения постоянного потока теплоты вдоль стержня температура стержня должна уменьшаться на постоянную величину Δt при смещении на фиксированное расстояние l по стержню. Это соответствует линейной зависимости $t(x)$, следовательно

$$t(x) = t_1 - \frac{(t_1 - t_0)}{l}x.$$



2.2.2 Для расчета количества теплоты, необходимой для нагрева стержня необходимо учесть, что температуры различных участков стержня различны. В данном случае (при линейном распределении температур) можно использовать среднюю температуру

$$Q_1 = cm \frac{t_1 - t_0}{2} = 0,39 \cdot 10^3 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 3,14 \cdot (2,5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 10 \cdot \frac{90 - 20}{2} \text{ Дж} = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

2.2.3 В установившемся режиме поток теплоты по стержню найдем, используя формулу (1) из справочных материалов

$$q = \lambda \frac{t_1 - t_0}{l} = 390 \cdot \frac{90 - 20}{10} \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Вт}.$$

2.3 При теплопереносе посредством испарения и конденсации воды следует учесть теплоту конденсации пара и остывания получившейся затем воды от температуры $t_1 = 90^\circ\text{C}$ до температуры $t_0 = 20^\circ\text{C}$. При этом количество выделившейся теплоты

$$Q = m(L + c\Delta t) = \rho S v \Delta \tau (L + c\Delta t).$$

Соответственно, поток теплоты, переносимый паром в такой установке (кинетической энергией пара пренебрежем в силу ее малости по сравнению с энергией Q)

$$q = \frac{Q}{\Delta \tau} = \rho S v (L + c\Delta t) = 0,70 \cdot 3,14 \cdot (2,5 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 50 \cdot (2,25 \cdot 10^6 + 4,2 \cdot 10^3 \cdot 70) \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 1,7 \cdot 10^5 \text{ Вт}$$