

Таким образом, к воде в указанном в задаче процессе необходимо подвести количество теплоты

$$Q = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 2500 \text{ Дж} .$$

Из решения задачи следует, что при испарении 1 г воды при 100 °С и атмосферном давлении из 2250 Дж подведенного тепла 170 Дж, т.е. 8%, идет на работу против внешних сил, а остальные 92% тепла увеличивают внутреннюю энергию системы жидкость – пар.

В заключение рассмотрим несколько более сложную задачу.

Задача 9. *Водяной пар находится в теплоизолированной камере при температуре $T = 300 \text{ К}$. Там же находится вода, масса которой мала по сравнению с массой пара. В процессе адиабатического сжатия температура пара возрастает на $\Delta T = 1 \text{ К}$, а часть воды испаряется. Найдите относительное увеличение массы пара в камере. Удельная теплота испарения при $T = 300 \text{ К}$ равна $\lambda = 2370 \text{ кДж/кг}$, пар можно считать идеальным газом с молярной теплоемкостью при постоянном объеме $C_V = 3R = 25 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$. Теплоемкостью воды пренебречь. Известно также, что малые относительные изменения температуры $\Delta T/T$ связаны с относительными изменениями давления насыщенного пара $\Delta p/p$ соотношением $\Delta p/p = k\Delta T/T$, где $k = 17$.*

Давление p , объем V , масса m , температура T насыщенного водяного пара с молярной массой M ($M = 18 \text{ г/моль}$) связаны уравнением состояния

$$pV = \frac{m}{M} RT .$$

Малые изменения величин этих параметров связаны соответствующим равенством

$$p\Delta V + V\Delta p = \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{\Delta m}{M} RT .$$

По закону сохранения энергии, в процессе адиабатического сжатия работа внешних сил, равная $-p\Delta V$ (объем пара уменьшается), идет на испарение массы воды Δm и на увеличение энергии пара на $mC_V\Delta T/M$ (изменение массы пара мало). Поэтому имеем

$$-p\Delta V = \lambda\Delta m + \frac{m}{M} C_V\Delta T .$$

По условию, кроме того,

$$\frac{\Delta p}{p} = k \frac{\Delta T}{T} .$$

Из всех равенств находим искомую

величину:

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{kR - R - C_V}{M\lambda + RT} \Delta T \approx \frac{13}{18} \frac{\Delta T}{T} \approx 0,0024 .$$

Упражнения

1. В калориметр, содержащий 2 кг льда при температуре $-5 \text{ }^\circ\text{C}$, добавили 200 г воды при температуре $+5 \text{ }^\circ\text{C}$. Сколько льда будет в калориметре после установления равновесия? Удельная теплоемкость льда $2,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, воды $4,2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, удельная теплота плавления льда 334 кДж/кг .

2. В сосуд с азотом впрыснули жидкий азот при температуре $-196 \text{ }^\circ\text{C}$ (температура кипения жидкого азота при атмосферном давлении), который испарился. Какое давление было в сосуде сразу после испарения жидкого азота, если к этому моменту теплообменом с окружающими сосуд телами можно пренебречь? Известно, что при прогреве до комнатной температуры в сосуде установилось давление 1,3 атм. Начальное давление в сосуде 1 атм, температура комнатная, молярная теплоемкость газообразного азота $20,8 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$, молярная теплота испарения жидкого азота $5,5 \text{ кДж/моль}$.

3. Подвижная перегородка делит герметичный теплопроводящий сосуд на две неравные части, в которых находится воздух при атмосферном давлении и комнатной температуре. В меньшую часть сосуда впрыскивают легко испаряющуюся жидкость, давление насыщенного пара которой при комнатной температуре равно 3,5 атм. Спустя некоторое время перегородка перестала двигаться, а вся жидкость испарилась. При этом объем части сосуда, в которой находится воздух и пары, увеличился в 2 раза по сравнению с начальным. Найдите, какую часть объема сосуда составляла вначале его меньшая часть. Объемом, занимаемым жидкостью, можно пренебречь.

4. В герметичный сосуд, содержащий сухой воздух при температуре $+17 \text{ }^\circ\text{C}$, впрыснули немного воды и стали медленно нагревать. Определите давление воздуха в сосуде до впрыскивания воды, если к тому моменту, когда испарилась вся вода, давление воздуха составило 46% от общего давления в сосуде. Начальный объем воды в сосуде составлял $1/1200$ от общего объема сосуда. Молярная масса воды 18 г/моль , плотность 1 г/см^3 .

5. Подвижный поршень делит объем замкнутого сосуда на две части в отношении 4 : 1. В одной части находится воздух, в другой – пары воды. При медленном охлаждении сосуда поршень начинает двигаться. Какая часть пара сконденсируется к тому моменту, когда поршень будет находиться посередине сосуда? Температура в обеих частях сосуда одна и та же. Объемом,

занимаемым сконденсированной водой, пренебречь.

6. Пропан (C_3H_8) массой 300 г закачан в переносной газовой баллон объемом 1 л. Давление в баллоне 10 атм, температура $17 \text{ }^\circ\text{C}$. Сколько пропана в газообразном состоянии содержится в баллоне, если при указанных давлении и температуре пропан превращается в жидкость с плотностью 440 кг/м^3 ?

7. В цилиндре под поршнем находится ν молей ненасыщенного водяного пара при температуре T . При медленном изобарическом охлаждении цилиндра половина пара сконденсировалась, а внутренняя энергия содержимого уменьшилась на ΔU . Какое количество теплоты пришлось при этом отвести от цилиндра, если его температура уменьшилась на ΔT ? Объемом, занимаемым водой, пренебречь.

8. Насыщенный водяной пар находится в теплоизолированной камере при температуре 300 К. В процессе адиабатического расширения температура в камере уменьшается на 1 К, и часть пара конденсируется. Найдите относительное уменьшение массы пара в камере. Удельная теплота испарения воды при 300 К составляет 2370 кДж/кг . Пар можно считать идеальным газом с молярной теплоемкостью при постоянном объеме $25 \text{ кДж/(моль} \cdot \text{К)}$. Известно также, что малые относительные изменения температуры $\Delta T/T$ связаны с относительными изменениями давления насыщенного пара $\Delta p/p$ соотношением $\Delta p/p = k\Delta T/T$, где $k = 17$. Теплоемкостью воды пренебречь.

9. Смесь воды и ее насыщенного пара находится при температуре $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Если смесь нагревать в изохорическом процессе, то вся вода испаряется при увеличении температуры до $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Чему равно давление насыщенного пара при $90 \text{ }^\circ\text{C}$, если в начальном состоянии масса воды составляет 29% от общей массы смеси? Объемом, занимаемым водой, пренебречь.