

Насыщенный пар

Насыщенный пар — это пар, который находится в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью (то есть скорость испарения жидкости равна скорости конденсации пара). При решении задач нужно иметь в виду следующие факты.

- Давление и плотность насыщенного пара зависят от его температуры, но не от объёма (при увеличении объёма испаряется дополнительное количество жидкости, при уменьшении объёма конденсируется часть пара).
- Давление насыщенного водяного пара при $100\text{ }^\circ\text{C}$ примерно равно $p_0 = 1\text{ атм} = 10^5\text{ Па}$.
- При описании состояний ненасыщенного и даже насыщенного пара приближённо работает уравнение Менделеева-Клапейрона.

ЗАДАЧА 1. («Покори Воробьёвы горы!», 2018, 7–9) В теплоизолирующем цилиндрическом сосуде под скользящем без трения поршнем находились в равновесии $m_1 = 200\text{ г}$ льда и $m_2 = 800\text{ г}$ воды при нормальном атмосферном давлении. В него закачивают насыщенный водяной пар под таким же давлением. Какую массу пара нужно закачать, чтобы температура содержимого увеличилась до $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$? Удельная теплота плавления льда $\lambda \approx 340\text{ кДж/кг}$, удельная теплоёмкость воды $c = 4200\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, удельная теплота парообразования воды $r = 2480\text{ кДж/кг}$.

□ $88 \approx u$

ЗАДАЧА 2. (МОШ, 2014, 10–11) В сосуд объёмом 5 кубических метров внесли блюдце с 200 г воды. Никаких водяных паров изначально в сосуде не было. Сосуд герметично закрыли и дождались установления равновесия. Температура в сосуде $25\text{ }^\circ\text{C}$, давление насыщенного пара воды при этой температуре 2,3 кПа. Абсолютный нуль составляет $-273\text{ }^\circ\text{C}$. Универсальная газовая постоянная $8,3\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$.

А) Найдите массу воды, оставшуюся на блюдце. Ответ выразите в граммах и округлите до третьей значащей цифры.

В) Сколько молекул водяного пара попадёт в куб длиной ребра 300 нанометров? Ответ округлите до второй значащей цифры.

С) Каким будет парциальное давление водяного пара в сосуде при увеличении температуры до $100\text{ }^\circ\text{C}$ Цельсия? Атмосферное давление составляет 100 кПа. Ответ выразите в килопаскалях и округлите до второй значащей цифры.

□ (A) 116; (B) 15000; (C) 6,9

ЗАДАЧА 3. (МОШ, 2014, 11) В сосуде объёмом 1 л при температуре 100°C находятся в равновесии вода (молярная масса 18 г/моль), водяной пар и азот (молярная масса 28 г/моль). Объём жидкой воды много меньше объёма сосуда. Давление в сосуде составляет 300 кПа , атмосферное давление 100 кПа . Универсальная газовая постоянная $8,3\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$. Абсолютный нуль температуры составляет -273°C .

А) Найдите общее количество вещества в газообразном состоянии. Ответ представьте в молях и округлите до второй значащей цифры.

В) Каково парциальное давление азота в системе? Ответ представьте в килопаскалях и округлите до первой значащей цифры.

С) Какова масса водяного пара? Ответ представьте в граммах и округлите до второй значащей цифры.

Д) Какова масса азота? Ответ представьте в граммах и округлите до второй значащей цифры.

Е) Каким будет давление при охлаждении системы до 0°C ? Ответ представьте в килопаскалях и округлите до второй значащей цифры. Давление насыщенного пара воды при 0°C составляет $0,6\text{ кПа}$.

(A) 0,097; (B) 200; (C) 0,58; (D) 1,8; (E) 150

ЗАДАЧА 4. (МФТИ, 1991) Смесь воды и её насыщенного пара занимает некоторый объём при температуре 90°C . Если смесь нагревать изохорически, то вся вода испаряется при увеличении температуры на 10°C . Чему равно давление насыщенного водяного пара при 90°C , если в начальном состоянии масса воды составляла 29% от массы всей смеси? Объёмом воды по сравнению с объёмом смеси пренебречь.

$\mu_{\text{пар}} = 0,09 = \frac{0,29}{1} \mu_{\text{жидк}} = d$

ЗАДАЧА 5. (МФТИ, 1985) При изотермическом сжатии $m = 9\text{ г}$ водяного пара при температуре $T = 373\text{ К}$ его объём уменьшился в 3 раза, а давление возросло вдвое. Найдите начальный объём пара.

$\mu = 18 \approx \mu_{\text{пар}} \frac{0,09}{m} = \mu$

ЗАДАЧА 6. («Физтех», 2021, 10) Водяной пар массой 3 г изотермически сжимают при температуре 81°C . Объём пара уменьшился в 3,5 раза, а давление возросло в 1,8 раза. Давление насыщенного водяного пара при 81°C равно $0,5 \cdot 10^5\text{ Па}$. Пар считать идеальным газом. Молярная масса пара $\mu = 18\text{ г/моль}$. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$.

1. Найти начальное давление пара.

2. Найти конечный объём пара.

$P_1 = 1,8 \cdot 10^5 \cdot 0,28 \approx 5 \cdot 10^4\text{ Па}; (2) V_2 = 5 \cdot 10^{-4}\text{ м}^3$

ЗАДАЧА 7. (МФТИ, 1996) В сосуде находится ненасыщенный пар. В процессе его изотермического сжатия объём, занимаемый паром, уменьшается в $\beta = 4$ раза, а давление возрастает в $\alpha = 3$ раза. Найти долю пара, которая сконденсировалась в этом процессе.

$\frac{V}{V_0} = \frac{g}{g_0} - 1$

ЗАДАЧА 8. (*МФТИ, 1996*) В сосуде находятся водяной пар и вода при температуре 100°C . В процессе изотермического расширения вода начинает испаряться. К моменту, когда она вся испарилась, объём пара увеличился в $\beta = 10$ раз. Найти отношение объёмов пара и воды в начале опыта.

$$161 \approx \frac{(1-\beta)^{0d\pi}}{LH^d}$$

ЗАДАЧА 9. (*«Физтех», 2020, 10*) В цилиндрическом сосуде под поршнем находится насыщенный водяной пар при температуре 95°C и давлении $P = 8,5 \cdot 10^4$ Па. В медленном изотермическом процессе уменьшения объёма пар начинает конденсироваться, превращаясь в воду.

1. Найти отношение плотности пара к плотности воды в условиях опыта.
2. Найти отношение объёма пара к объёму воды к моменту, когда объём пара уменьшится в $\gamma = 4,7$ раза.

Плотность и молярная масса воды $\rho = 1$ г/см³, $\mu = 18$ г/моль.

$$0\pi\epsilon \approx \frac{d\pi}{LH^d} \frac{1-l}{1} = \frac{a\lambda}{\kappa/\lambda} (\tau : \nu - 0\pi \cdot \epsilon \approx \frac{LH^d}{d\pi} = \frac{d}{\pi d} (1$$

ЗАДАЧА 10. (*«Физтех», 2020, 10*) Поршень делит объём горизонтального герметичного цилиндра на две равные части, в каждой из которых находится вода и водяной пар при температуре $T = 373$ К. Масса воды в каждой части в 5 раз меньше массы пара. Поршень находится на расстоянии $L = 0,6$ м от торцов, площадь поперечного сечения поршня $S = 20$ см². Масса M поршня такова, что $\frac{Mg}{S} = 0,01P_0$, здесь P_0 — нормальное атмосферное давление.

1. Найдите массу m воды в каждой части в начальном состоянии.
2. Цилиндр ставят на дно. Найдите вертикальное перемещение h поршня к моменту установления равновесного состояния.

Температура в цилиндре поддерживается постоянной. Трение считайте пренебрежимо малым. Молярная масса водяного пара $\mu = 18$ г/моль, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К). Объём воды намного меньше объёма пара.

$$\text{cm } 21 = 7 \frac{\epsilon}{1} \approx T - 7 \frac{66 \cdot 0 \cdot \epsilon}{9} = \eta (2 : \nu \cdot 1 \cdot 0 \approx \frac{LH^d}{S T^0 J \pi} = \pi (1$$

ЗАДАЧА 11. (*«Физтех», 2013*) В цилиндре под поршнем находится водяной пар при температуре T . При изобарическом охлаждении цилиндра объём уменьшается в 3 раза, а температура — на 20%. Найдите работу, совершённую над содержимым цилиндра в этом процессе, если к концу охлаждения в цилиндре образовалось ν молей жидкости. Объём жидкости намного меньше объёма пара. Пар считать идеальным газом.

$$LH^d \frac{1}{3} = V$$

ЗАДАЧА 12. («Физтех», 2017, 10–11) Поршень делит объём герметичного вертикально расположенного цилиндра на две части. Стенки цилиндра хорошо проводят теплоту. Снаружи цилиндра поддерживается постоянная температура $T = 373$ К. Поршень создаёт своим весом дополнительное давление $p = p_0/5$, где p_0 — нормальное атмосферное давление. Под поршнем в объёме $V_0 = 1$ л находится воздух, над поршнем в объёме V_0 — вода массой $m_1 = 1,2$ г и водяной пар. Система в равновесии. Цилиндр переворачивают вверх дном. После наступления равновесия под поршнем находится вода и водяной пар, над поршнем — воздух.

- 1) Найти объём пара в конечном состоянии.
- 2) Найти массу воды в конечном состоянии.

Объём воды значительно меньше объёма цилиндра, масса воды значительно меньше массы поршня. Трением поршня о цилиндр пренебречь. Молярная масса водяного пара $\mu = 18$ г/моль, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$p_1 V_1 \approx \frac{\lambda H \tau}{\lambda} + \tau u = \tau u \quad (\tau \cdot V_1 = \mu \lambda \frac{\tau}{\lambda} = \lambda \tau)$$

ЗАДАЧА 13. («Физтех», 2019, 11) Подвижный поршень делит объём горизонтально расположенного сосуда на два отсека с общим объёмом $V = 150$ л. В первый отсек ввели $\nu_1 = 1$ моль воды, а во второй ввели $\nu_2 = 2$ моль азота. Можно считать, что объём введенной воды намного меньше V . В отсеках установилась температура $T_1 = 275$ К. Сосуд вместе с содержимым прогревают до температуры $T_2 = 373$ К. Давление насыщенного пара воды при температуре $T_1 = 275$ К равно $P_H = 705$ Па. Плотность воды $\rho = 1$ г/см³.

1. Найти давление P_1 в сосуде до прогревания.
2. Найти объём V_1 первого отсека до прогревания.
3. Найти давление P_2 в сосуде после прогревания.

$$P_1 V_1 \approx \frac{\lambda}{\tau} \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,3 \cdot 10^5 \approx \frac{\lambda}{\tau} \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \quad (P_2 = 18 \text{ см}^3 \cdot 3 \text{ Па} \cdot 2) \quad (P_2 = 18 \text{ см}^3 \cdot 3 \text{ Па} \cdot 2)$$

ЗАДАЧА 14. («Росатом», 2019, 11) В закрытом сосуде содержится воздух и вода. Внутри сосуда поддерживается температура $t = 100$ °С. Объём сосуда $V = 10$ л, давление $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па. Известно, что жидкая вода в сосуде есть и что она занимает очень малый объём. В результате изотермического расширения объём сосуда вырос до величины $2V$, а давление упало до величины $p_2 = 1,4 \cdot 10^5$ Па. Сколько молей воды находятся в сосуде? Универсальная газовая постоянная $R = 8,3$ Дж/(моль · К). Атмосферное давление — $p_0 = 10^5$ Па.

$$p_2 V_2 = \frac{\lambda H}{\lambda} = \frac{\lambda H}{\lambda} = \frac{\lambda H}{\lambda}$$

ЗАДАЧА 15. («Росатом», 2020, 11) Один моль азота находится в сосуде объёмом $V = 1$ л под давлением $p = 10^5$ Па. Газ откачивают, поддерживая температуру сосуда (со всем содержимым) неизменной. Какую массу газа придется откачать к тому моменту, когда давление в сосуде упадет вдвое? Никаких других газов, кроме азота, в сосуде нет. Дан ряд табличных параметров азота (не все они понадобятся для решения): молярная масса $\mu = 28$ г/моль, температура кипения при атмосферном давлении $t_k = -196$ °С, удельная теплота испарения $\lambda = 5,6$ кДж/моль, температура плавления $t_{пл} = -210$ °С. Универсальная газовая постоянная — $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$p_1 V_1 = n \left(\frac{\lambda H \tau}{\lambda} - \mu \right) = \mu \nabla$$

ЗАДАЧА 16. («Курчатов», 2018, 11) Горизонтальный цилиндр закрыт свободно скользящим поршнем. В цилиндре находится водяной пар при температуре $T_1 = 453$ К и давлении $2p_0$, $p_0 = 0,1$ МПа. Пар изохорически охлаждают до температуры $T_2 = 373$ К, а затем изотермически уменьшают его объём в 2 раза. При этом внешние силы, действующие на поршень, совершают работу $A = 450$ Дж. Найдите массу m сконденсировавшейся воды. Давление насыщенного пара при температурах T_1 и T_2 равно соответственно $10p_0$ и p_0 , молярная масса воды $\mu = 18$ г/моль универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К). Объёмом воды по сравнению с объёмом пара пренебрегите, пар считайте идеальным газом. Ответ выразите в граммах и округлите до целого.

$$m = \frac{\mu L_{\text{пл}}}{(10p_0 - p_0)V} = m$$

ЗАДАЧА 17. (МФТИ, 1991) В цилиндре под поршнем находятся ν молей жидкости и ν молей её насыщенного пара при температуре T_0 . К содержимому цилиндра подвели количество теплоты Q , медленно и изобарически нагревая его, и температура внутри цилиндра увеличилась на ΔT . Найти изменение внутренней энергии содержимого цилиндра. Начальным объёмом жидкости пренебречь.

$$(L_{\text{пл}} + \nu L) \nu \Delta T = Q$$

ЗАДАЧА 18. (МФТИ, 1993) Для насыщенного водяного пара вблизи температуры 100°C малые относительные изменения давления $\Delta p_{\text{н}}/p_{\text{н}}$ и температуры $\Delta T_{\text{н}}/T_{\text{н}}$ связаны формулой $\Delta p_{\text{н}}/p_{\text{н}} = 13\Delta T_{\text{н}}/T_{\text{н}}$. При какой температуре закипит вода на высоте Останкинской телебашни $H = 550$ м? Давление воздуха в изотермической атмосфере $p(h)$ с высотой h изменяется по закону $p(h) = p(0) \cdot \exp(-\mu gh/RT)$, где $p(0)$ — нормальное атмосферное давление у поверхности земли, $\mu = 29$ г/моль — средняя молярная масса воздуха, $g = 9,8$ м/с² — ускорение свободного падения, $R = 8,31$ Дж/(моль · К), $T = 273$ К.

Указание. При малых $x \ll 1$ имеет место формула $e^{-x} \approx 1 - x$.

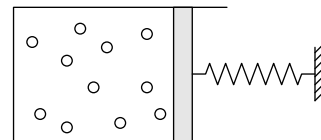
$$\Delta T = \frac{L_{\text{пл}}}{\mu H} \ln \frac{p_{\text{н}}(H)}{p_{\text{н}}(0)}$$

ЗАДАЧА 19. (МФТИ, 1997) Насыщенный водяной пар находится в цилиндре под поршнем при температуре 120°C . При медленном изотермическом уменьшении объёма цилиндра пар начинает конденсироваться. К моменту, когда сконденсировалось $m = 5$ г пара, объём, им занимаемый, уменьшился на $\Delta V = 4,5$ л.

- 1) Какая по величине работа была совершена внешней силой в этом процессе?
- 2) Сколько пара было в цилиндре вначале, если в конце опыта вода занимала 0,5% объёма цилиндра?

$$m = \mu \left(\frac{\Delta V}{V} + 1 \right) \nu$$

Задача 20. (МФТИ, 1997) В цилиндре поршнем с пружиной (см. рисунок) заперт водяной пар в объёме $V = 4$ л. Температура в цилиндре поддерживается постоянной и равной 100°C . В цилиндр впрыскивается 4 г воды, и поршень начинает перемещаться. После установления равновесия часть воды испарилась, а объём цилиндра увеличился в два раза.



- 1) Какая масса пара была в цилиндре вначале?
- 2) Сколько воды испарилось к концу опыта?

Внешнее давление отсутствует, длина недеформированной пружины соответствует положению поршня у дна цилиндра.

$$\frac{1}{2} \rho_0 V_0 = \frac{\rho_0 V_0 z}{\lambda} = \rho_0 V_0 \Delta z \quad \text{и} \quad \frac{1}{2} \rho_0 V_0 = \rho_0 V_0 \Delta z \quad (1)$$

Задача 21. (МФТИ, 2005) В цилиндре под поршнем находится ненасыщенный водяной пар под давлением $p = 1$ атм. В процессе изобарического сжатия конечный объём, который занимает пар, уменьшается в $k = 4$ раза по сравнению с объёмом, который он занимал вначале. При этом часть пара конденсируется, а объём образовавшейся воды составляет $\alpha = 1/1720$ от конечного объёма пара. Во сколько раз уменьшилась температура пара в указанном процессе? Плотность воды $\rho = 1$ г/см³, молярная масса пара $\mu = 18$ г/моль.

$$z = \frac{\frac{d\rho}{\rho} + 1}{\frac{d\rho}{\rho}} = \frac{z_L}{z_A}$$

Задача 22. (МФТИ, 2005) В цилиндре под поршнем находится насыщенный водяной пар и вода при температуре 100°C . Объём воды составляет $\alpha = 1/860$ часть объёма, который занимает пар. При изотермическом расширении давление уменьшилось в $\beta = 2$ раза, при этом вся вода испарилась. Во сколько раз увеличился объём пара? Плотность воды $\rho = 1$ г/см³, молярная масса пара $\mu = 18$ г/моль.

$$9 = \left(\frac{d\rho}{\rho} + 1 \right) \rho = \frac{\rho_A}{\rho_L}$$

Задача 23. (МФТИ, 2001) В цилиндре под поршнем находятся 0,5 моля воды и 0,5 моля пара. Жидкость и пар медленно нагревают в изобарическом процессе, так что в конечном состоянии температура пара увеличивается на ΔT градусов. Сколько тепла было подведено к системе «жидкость–пар» в этом процессе? Молярная теплота испарения жидкости в заданном процессе равна Λ . Внутренняя энергия ν молей пара равна $U = 3\nu RT$ (R — газовая постоянная).

$$\text{что } Q = \nu \Lambda + (L \Delta T + \nu) \rho = \rho$$

ЗАДАЧА 24. («Физтех», 2021, 10) В теплоизолированном цилиндре с гладкими стенками под лёгким поршнем находится вода массой $m = 5,5$ г при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Площадь поршня $S = 500$ см², наружное давление $P_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па. К содержимому цилиндра медленно подводят теплоту, вода начинает кипеть.

1. Какое количество теплоты Q_1 подвели к воде до начала кипения?

После начала кипения к содержимому цилиндра подвели $Q_2 = 17430$ Дж теплоты.

2. Найдите перемещение H поршня в процессе подведения теплоты.

Удельная теплоёмкость воды $c = 4180$ Дж/(кг·К). Удельная теплота парообразования воды при 100°C $L = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг. Удельная теплоёмкость водяного пара при постоянном давлении $P_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па равна $c_p = 2200$ Дж/(кг·К). Водяной пар считайте идеальным газом.

$$m \cdot c \cdot \Delta T + \frac{m \cdot L}{M} + \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T}{M} = H \cdot S \cdot P_0 \approx (0,0055 - 0,0055) \cdot 500 \cdot 10^{-4} \cdot 10^5$$

ЗАДАЧА 25. (МФТИ, 2001) В цилиндре под поршнем находится один моль ненасыщенного пара при температуре T . Пар сжимают в изотермическом процессе, так что в конечном состоянии половина его массы сконденсировалась, а объём пара уменьшился в $k = 4$ раза. Найти молярную теплоту конденсации пара, если в указанном процессе от системы «жидкость–пар» пришлось отвести количество теплоты Q ($Q > 0$).

Указание. Пар можно считать идеальным газом. Работа, совершаемая в изотермическом процессе ν молями пара при расширении от объёма V_1 до V_2 , равна $\nu RT \ln(V_2/V_1)$.

$$\left(\frac{c_p}{M} \ln \frac{V_2}{V_1} - \frac{L}{M} \right) \frac{m}{M} = \nu$$

ЗАДАЧА 26. (МФТИ, 2001) Лёгкий подвижный теплопроводящий поршень делит объём вертикально расположенного замкнутого цилиндра на две части. В нижней части под поршнем находятся в равновесии жидкость и её пар, температура которых поддерживается постоянной и равна T_0 . В верхней части цилиндра над поршнем находится газообразный гелий. К гелию квазистатически подводится некоторое количество теплоты, и он совершает работу A . При этом часть пара сконденсировалась, и от пара с водой пришлось отвести количество теплоты Q .

- 1) Какое количество теплоты было подведено к гелию?
- 2) Найти удельную теплоту испарения жидкости.

Молярная масса пара μ . Трением и теплоёмкостью поршня пренебречь. Считать, что объём жидкости значительно меньше объёма образовавшегося из неё пара.

$$\frac{A}{\mu} = T_0 \left(\nu \frac{c_p}{M} - \frac{L}{M} \right)$$

Задача 27. (МФТИ, 2001) Лёгкий подвижный теплопроводящий поршень делит объём вертикально расположенного цилиндра на две части. Под поршнем в нижней части цилиндра находятся в равновесии вода и пар, температура которых поддерживается постоянной и равной T_0 . В верхней части цилиндра над поршнем находится газообразный гелий.

1) Какое количество теплоты надо подвести квазистатически к пару и воде, чтобы часть воды массой Δm испарилась?

2) Сколько тепла необходимо при этом отвести от гелия?

Удельная теплота испарения воды λ , молярная масса пара μ . Трением и теплоёмкостью поршня пренебречь. Считать, что объём пара значительно больше объёма воды, из которой он образовался.

$$\frac{dQ}{dm} = \lambda + \frac{c_p}{\mu} T_0 = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$

Задача 28. (МФТИ, 2007) Тонкий подвижный теплопроводящий поршень делит герметичный цилиндр объёмом 3,7 л на две части. В одной части находится вода, в другой — воздух при давлении $p = 0,32$ атм. Начальная температура в цилиндре $t_1 = 7^\circ\text{C}$. При медленном нагревании поршень в некоторый момент начинает двигаться, при температуре $t_2 = 100^\circ\text{C}$ останавливается и при дальнейшем нагревании остаётся неподвижным.

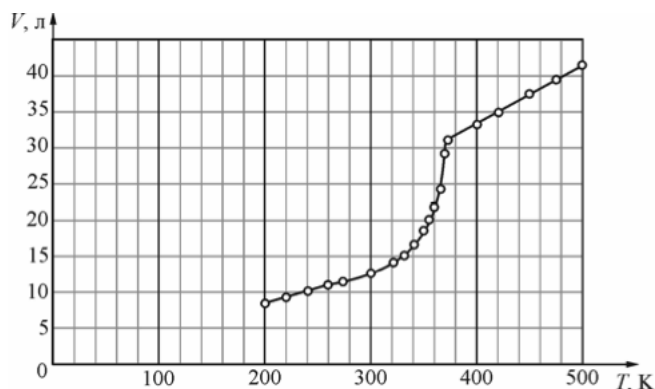
1) Какая масса воды находится в начальный момент в газообразном состоянии?

2) Найдите полную массу воды в цилиндре.

Объёмом жидкости можно пренебречь по сравнению с объёмом цилиндра. Давление насыщенных паров воды при температуре 20°C равно $p_{20} = 0,023$ атм. Силу тяжести и трение поршня о цилиндр не учитывать.

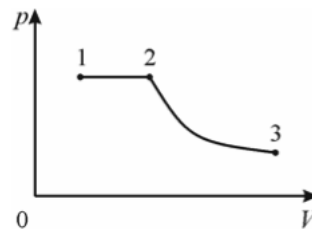
$$\frac{dQ}{dm} \approx \left(\frac{v_L}{d} - \frac{c_p}{\mu} \right) \frac{dQ}{dm} = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$

Задача 29. (МОШ, 2014, 10) Знайка решил провести исследования Гей-Люссака для идеального газа, только более аккуратно. Для этих целей он взял цилиндрический сосуд большого объёма с поршнем, который мог двигаться практически без трения, вынул поршень и охладил сосуд с поршнем до температуры 200 К. Затем он вставил поршень обратно в сосуд так, что внутри оказался охлаждённый до той же температуры воздух, обеспечил постоянное давление и провёл измерения зависимости объёма V газа в сосуде от температуры T . По полученным результатам Знайка построил график (см. рисунок). Найденная зависимость мало напоминала результаты, полученные Гей-Люссаком. Знайка понял свою ошибку. Он вставил поршень в цилиндр при температуре 200 К и, очевидно, на дне сосуда при этом оказалось некоторое количество льда, который образовался из воды, сконденсировавшейся при охлаждении воздуха. Оцените массу льда, который оказался в цилиндре у Знайки, если давление в течение опыта было равно $2 \cdot 10^5$ Па. Молярная масса воды 18 г/моль.



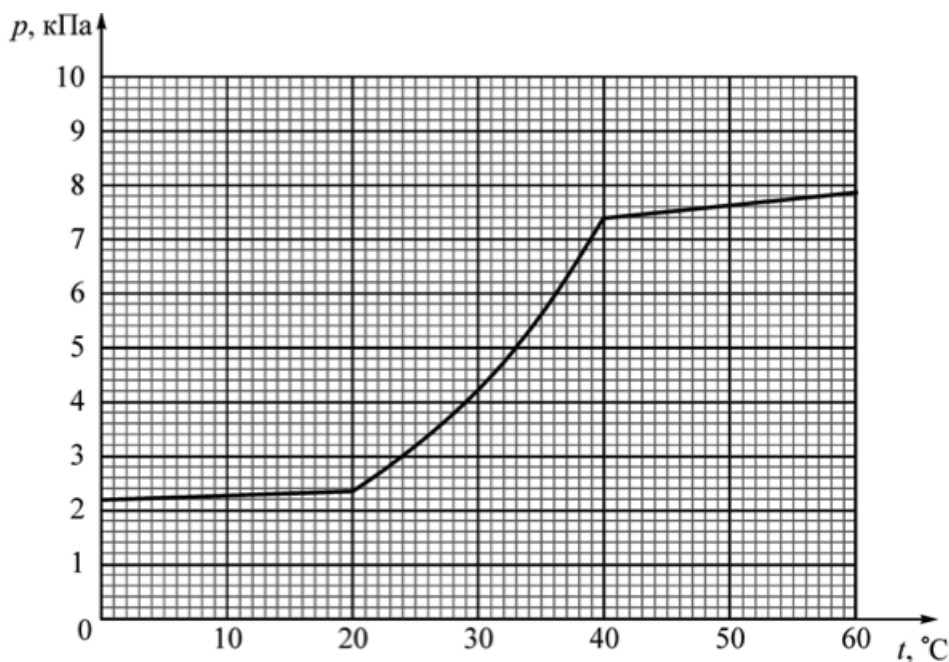
181

Задача 30. (МОШ, 2014, 11) В гладком цилиндре под подвижным поршнем находятся в равновесии ν молей жидкости и ν молей её пара (состояние 1 на pV -диаграмме). Систему «жидкость-пар» сначала медленно нагрели в изобарическом процессе 1–2, при этом её абсолютная температура возросла в два раза. Затем систему медленно охладили в адиабатическом процессе 2–3 до температуры T_3 . Какое количество теплоты получила система «жидкость-пар» в процессе 1–2, если работы, совершённые этой системой в процессах 1–2 и 2–3, были одинаковыми? Молярная теплота парообразования в процессе 1–2 равна r . В процессе 2–3 конденсация не происходит. Считать пар идеальным газом с молярной теплоёмкостью в изохорном процессе $C_V = 3R$. Объём жидкости в состоянии 1 считать пренебрежимо малым по сравнению с объёмом пара.



$$\left(\frac{r}{3R} + 1 \right) r = \tau \Delta Q$$

Задача 31. (МОШ, 2012, 11) Сосуд объёмом $V = 1 \text{ м}^3$ разделён на две части лёгким тонким подвижным теплопроводящим поршнем, по одну сторону от которого находится вода, по другую — азот. График зависимости давления в системе от температуры приведён на рисунке. Сколько молей воды и сколько молей азота находятся в сосуде? Трения нет, универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

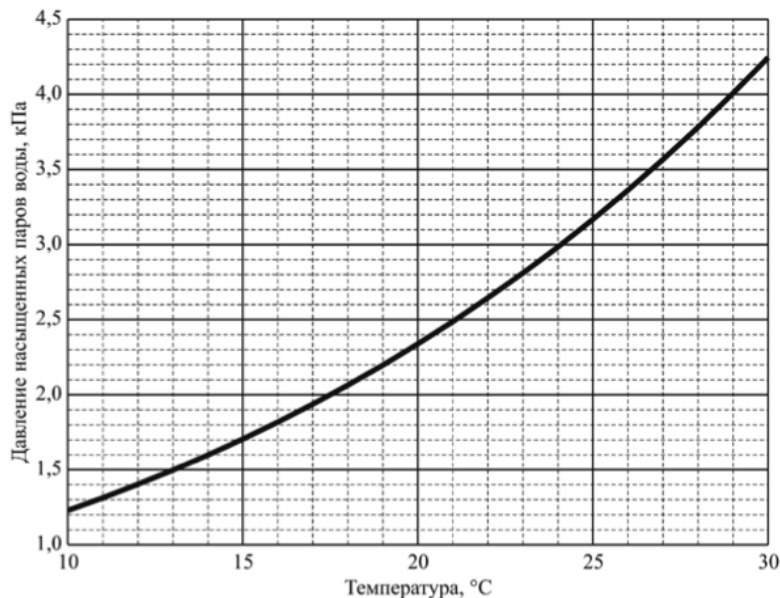


$$n_{\text{азот}} \approx 0,97 \pm 0,01 \text{ моль}, n_{\text{воды}} \approx 1,87 \pm 0,02 \text{ моль}$$

Задача 32. (МОШ, 2017, 11) В теплоизолированном цилиндре под не проводящим теплоту поршнем находятся в термодинамически равновесном состоянии аргон и насыщенные пары воды при температуре $T_1 = 302 \text{ К}$ и давлении $p = 2 \text{ атм}$. Сразу после быстрого увеличения объёма смеси под поршнем в $n = 1,06$ раз температура в цилиндре уменьшается до некоторой величины T_2 , а водяные пары оказываются в термодинамически неравновесном состоянии пересыщения, при котором их давление p_2 становится выше давления насыщенного пара $p_{\text{нас}}(T_2)$ при новой температуре. Со временем часть пара конденсируется, и система вновь приходит в состояние устойчивого термодинамического равновесия.

- 1) Найдите температуру T_2 .
- 2) Определите давление p_2 .
- 3) Верно ли, что в новом состоянии устойчивого равновесия температура под поршнем будет отличаться от T_2 менее чем на 1 К?

Удельная теплоёмкость воды $c = 4200$ Дж/(кг · К), теплоёмкость одного моля водяного пара при постоянном объёме $C_V = 3R$, удельная теплота испарения воды $L = 2,33 \cdot 10^6$ Дж/кг, молярная масса воды $\mu = 18$ г/моль. График зависимости давления насыщенных паров воды от температуры представлен на рисунке.



$$1) T_2 = 290 \text{ K}; 2) p_2 = 3,6 \text{ кПа}; 3) \text{ нет}$$

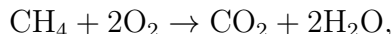
ЗАДАЧА 33. («Покори Воробьёвы горы!», 2017, 10–11) В закрытом с обоих концов цилиндре объёмом $V = 2$ л свободно ходит невесомый тонкий поршень. В пространстве с одной стороны поршня вводится $m_1 = 2$ г воды; с другой стороны поршня — $m_2 = 1$ г азота. Найти отношение объёмов частей цилиндра при $t = 100$ °С. Молярная масса воды $\mu_1 = 18$ г/моль, молярная масса азота $\mu_2 = 28$ г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$\frac{V_2}{V_1} \approx 0,82$$

ЗАДАЧА 34. («Покори Воробьёвы горы!», 2015, 10–11) Герметичный гладкий вертикальный цилиндр сечением S разделён на две части тяжёлым теплоизолирующим подвижным поршнем массы M . Под поршнем находится гелий, начальное давление которого равно p , а над поршнем — насыщенный водяной пар с температурой T . Гелий медленно нагревают, а температуру пара поддерживают постоянной. Во сколько раз отличается количество теплоты, отведённое от пара, от количества теплоты, сообщённого гелию? Молярную массу μ и удельную теплоту парообразования λ воды, а также универсальную газовую постоянную R и ускорение свободного падения g считать известными.

$$\left(\frac{S^d}{b^d N} - 1 \right) \frac{L \mu g}{4 \sqrt{z}} = \frac{1}{z} \frac{Q}{Q}$$

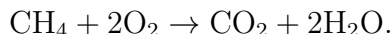
ЗАДАЧА 35. («Покори Воробьёвы горы!», 2015, 10–11) Прочный баллон ёмкостью $V = 20$ л заполнили смесью метана (CH_4) и кислорода (O_2) при температуре $t_0 = 28^\circ\text{C}$. В баллоне произвели маломощный разряд, вызвавший химическую реакцию



а затем остудили его содержимое до температуры $t_1 = 100^\circ\text{C}$. После этого на стенках сосуда выступили мелкие капельки воды общей массой $m = 1$ г, а давление в баллоне стало равно $p = 1,775 \cdot 10^5$ Па. Найти давление в баллоне до начала реакции. Какими могли быть массы газов, закаченных в баллон? Молярные массы считать равными: для метана $\mu_1 = 16$ г/моль, воды $\mu_2 = 18$ г/моль и кислорода $\mu_3 = 32$ г/моль, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$p_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; \mu_1 = 16 \text{ г/моль}; \mu_2 = 18 \text{ г/моль}; \mu_3 = 32 \text{ г/моль}; R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

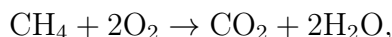
ЗАДАЧА 36. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) В очень прочном баллоне объемом $V = 50$ л находится 96 г смеси метана CH_4 с кислородом O_2 . При температуре $t_1 = 28^\circ\text{C}$ давление в баллоне равнялось $p_1 = 200$ кПа. Слабая электрическая искра подожгла метан, вызвав реакцию



После завершения реакции содержимое баллона охладили до температуры $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Каким стало давление в баллоне? Нормальное атмосферное давление $p_0 \approx 101$ кПа.

$$p_2 = p_0 \approx 101 \text{ кПа}$$

ЗАДАЧА 37. («Покори Воробьёвы горы!», 2019, 10–11) В очень прочном баллоне объемом $V = 90$ л находится 134 г смеси метана (CH_4), кислорода (O_2) и азота (N_2). При температуре $t_1 = 33^\circ\text{C}$ давление в баллоне равнялось $p_1 = 1,4 \cdot p_0$, где $p_0 \approx 101$ кПа — нормальное атмосферное давление. Слабая электрическая искра подожгла метан, вызвав реакцию



причем в ходе этой реакции оба реагента израсходовались полностью. После завершения реакции содержимое баллона охладили до температуры $t_2 = 100^\circ\text{C}$. Каким стало давление в баллоне? Растворением углекислого газа пренебречь.

$$p_2 \approx 170 \text{ кПа}$$

ЗАДАЧА 38. («Покори Воробьёвы горы!», 2016, 10–11) В гладком горизонтальном цилиндрическом сосуде между его вертикальной стенкой и подвижным вертикальным поршнем находится $m = 88$ г смеси азота и воды при температуре $t_0 = 100^\circ\text{C}$. Наружное давление равно нормальному атмосферному $p_0 \approx 101$ кПа, и смесь занимает объем $V_0 \approx 107,4$ л. Смесью медленно охладили до температуры $t_1 = 80^\circ\text{C}$, а затем поршень закрепили и продолжили медленное охлаждение. Сколько грамм жидкой воды будет находиться в сосуде при температуре $t_2 = 60^\circ\text{C}$? Давление насыщенного водяного пара при этой температуре $p_{\text{н}} \approx 20$ кПа. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$m \approx 8,8 \text{ г}$$

ЗАДАЧА 39. (Всеросс., 1998, ОЭ, 10) Найдите для воды молярную теплоту парообразования L_2 при температуре T_2 , зная молярную теплоту парообразования L_1 при температуре T_1 . Считать, что молярная теплоёмкость воды C в интервале температур $T_1 < T < T_2$ постоянна, а водяной пар является идеальным газом с молярной теплоёмкостью при постоянном объеме $C_V = 3R$.

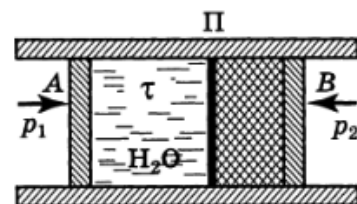
Молярной теплотой парообразования при некоторой температуре T называется количество теплоты, необходимое для превращения одного моля воды в пар в двухфазной системе «вода — насыщенный пар» при постоянной температуре T .

$$(L_2 - L_1)(C - 3R) + 3RT = L_1$$

ЗАДАЧА 40. (Всеросс., 1998, финал, 10) Водяной пар массой $m = 1$ г находится в теплоизолированной камере объёмом $V = 39$ л при температуре $T = 300$ К. В той же камере имеется вода, масса которой меньше массы пара. В процессе адиабатного сжатия температура пара возрастает на $\Delta T = 1$ К, а часть воды испаряется. На сколько увеличится при этом масса пара в камере? Удельная теплота испарения воды $L = 2,37 \cdot 10^6$ Дж/кг; пар считать идеальным газом с молярной теплоёмкостью $C_V = 3R \approx 25$ Дж/(моль · К); теплоёмкостью воды пренебречь. Известно также, что при малых изменениях температуры ΔT насыщенного пара его давление изменяется на $\Delta p = k\Delta T$, где $k = 2 \cdot 10^2$ Па/К.

$$\Delta m \approx L \Delta V \frac{L + T \tau}{T^2 m - L \tau} = m \Delta T$$

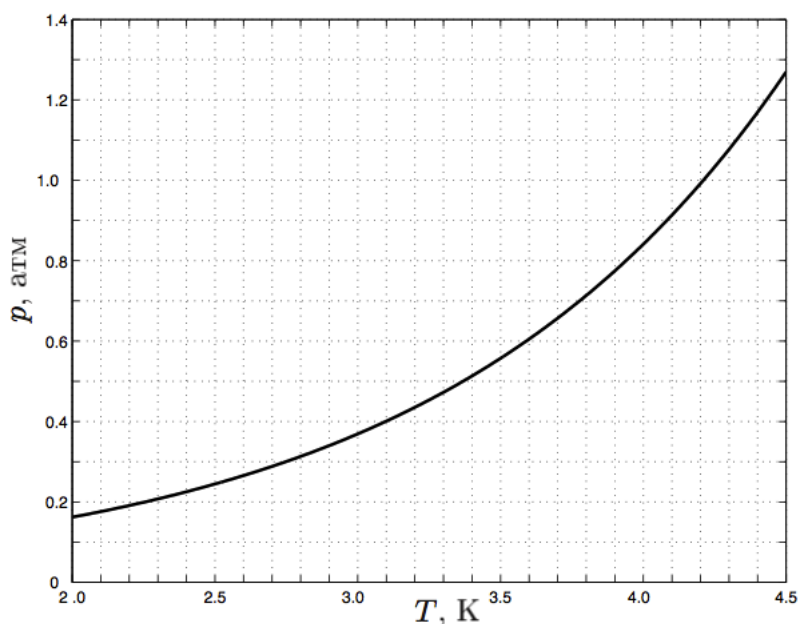
ЗАДАЧА 41. (Всеросс., 1995, финал, 10) Теплоизолированная труба разделена на два отсека неподвижной перегородкой П с многочисленными тончайшими отверстиями (порами) и закрыта с обоих концов подвижными и теплоизолированными поршнями А и В. В начальный момент между поршнем А и перегородкой находится при температуре $t_1 = 95^\circ\text{C}$ вода, масса которой $m = 1$ кг. На поршень А действует давление $p_1 = 10^3$ атм, а поршень В прижат к перегородке П атмосферным давлением p_2 . Вода под давлением поршня А начинает очень медленно просачиваться сквозь перегородку (рис.). Определите долю воды, испарившейся к моменту окончания процесса продавливания. Удельную теплоёмкость воды считайте постоянной и равной $c_v = 4,2$ кДж/(кг · К), а удельную теплоту парообразования $\lambda = 2260$ кДж/кг. Считать, что удельный объём воды не зависит от давления и температуры, а оба поршня перемещаются без трения.



$$\xi = \frac{m \lambda}{T^2 m - L \tau} = \nu$$

ЗАДАЧА 42. (Всеросс., 2004, финал, 10) Для хранения жидкого гелия применяется двойной сосуд Дьюара, состоящий из внешнего сосуда Дьюара, заполненного жидким азотом при температуре $T_a = 77$ К, и внутреннего сосуда Дьюара, заполненного жидким гелием. Передача теплоты от азота к гелию через вакуумный промежуток приводит к испарению гелия. Для поддержания постоянной температуры гелия производится непрерывная откачка его насыщенных паров из внутреннего сосуда. При некоторой скорости откачки в стационарном режиме температура гелия равна $T_0 = 4,0$ К. Скорость откачки увеличивают в полтора раза (по объёму). Определите установившуюся температуру T гелия. Зависимость давления насыщенных паров гелия от температуры приведена на рисунке.

Примечание. Сосудом Дьюара называют сосуд с двойными стенками, из пространства между которыми откачан воздух для уменьшения теплопередачи.



Х 90'0 ± 3.25'8 = L

ЗАДАЧА 43. (Всеросс., 2003, ОЭ, 11) Герметичный сосуд состоит из двух одинаковых шаров объёмом $V = 5$ м³ каждый и тонкой вертикальной трубки (рис.). Поршень в трубке делит сосуд на две части: в нижней — воздух при постоянной температуре, а в верхней — вода и пар, причём площадь свободной поверхности воды в верхнем шаре $S = 3$ см². При каких температурах T_0 воды и пара возможна такая ситуация, что при малых изменениях ΔT_0 этой температуры поршень смещается в одну и ту же сторону от положения равновесия независимо от знака ΔT_0 ?



Примечание. Если при некоторой температуре T давление насыщенного пара p , то их малые изменения связаны уравнением Клаузиуса $\Delta p = \frac{\lambda \mu p \Delta T}{RT^2}$, где молярная масса $\mu = 18$ г/моль, удельная теплота парообразования $\lambda = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг, универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

Х 088 = $\frac{(\lambda^6 + S\chi)\mu}{\lambda^6 \mu \chi} = 0L$

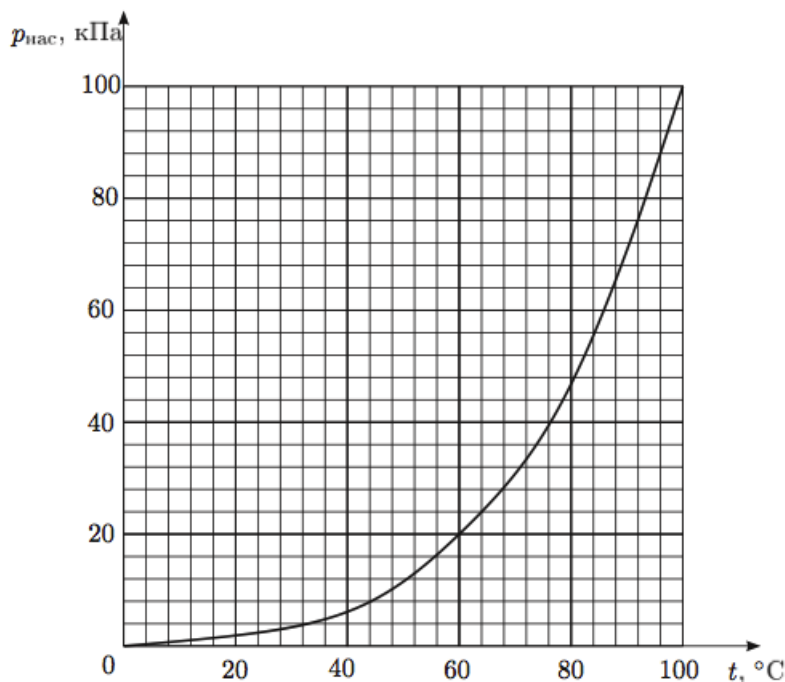
ЗАДАЧА 44. (Всеросс., 2002, ОЭ, 11) В откачанный цилиндрический сосуд с поршнем впрыснули некоторое количество воды. Содержимое сосуда довели до равновесного состояния с температурой $t_1 = 76$ °С, при этом объём сосуда составил $V_1 = 50$ л. Далее с содержимым сосуда

совершают квазистатический круговой цикл, состоящий из:

- 1) изотермического расширения до объёма $V_2 = 3V_1$, в результате которого давление в сосуде уменьшается в два раза;
- 2) изобарического сжатия до объёма $V_3 = \frac{3}{2}V_1$;
- 3) изотермического сжатия до объёма $V_4 = V_1$;
- 4) изохорического нагревания до начальной температуры.

Принимая во внимание зависимость давления насыщенных паров воды от температуры (рис.), найдите:

- а) максимальную и минимальную температуры в цикле;
- б) массу воды, впрыснутой в сосуд;
- в) работу, совершенную системой в цикле.



Примечание. При изотермическом расширении от объёма V_1 до объёма V_2 идеальный газ совершает работу $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$, где m/μ — количество молей газа, T — температура газа, R — универсальная газовая постоянная.

$$p_{\text{нас}} \approx (1 - z) \frac{p_{\text{нас}}}{z} = p_{\text{нас}} \left(\frac{1 - z}{z} \right) = p_{\text{нас}} \frac{1 - z}{z}$$

Задача 45. (МОШ, 2019, 10) Сухой лёд — твёрдый диоксид углерода (CO_2), при нормальных условиях переходящий в газообразное состояние, минуя жидкую фазу (процесс сублимации). При давлении $p_0 = 10^5$ Па динамическое равновесие между твёрдой и газовой фазами достигается при температуре $t_S = -79^\circ\text{C}$, при которой плотность твёрдого диоксида углерода равна $\rho = 1560$ кг/м³, а удельная теплота сублимации равна $q = 590$ кДж/кг. При температуре $T_0 = 300$ К в термос объёмом $V_0 = 1,0$ л, в котором изначально ничего не было, кроме воздуха, поместили небольшой кусочек сухого льда объёмом $V_1 = 1$ см³ и тут же герметично закрыли пробкой. Какая температура и какое давление установятся в термосе в состоянии термодинамического равновесия? Начальная температура сухого льда равна t_S . Молярная масса диоксида углерода равна $\mu_1 = 44$ г/моль. Считайте, что термос обеспечивает идеальную теплоизоляцию содержимого, молярная теплоёмкость воздуха при постоянном объёме равна $c_V = \frac{5R}{2}$.

$$p_{\text{нас}} \cdot L \approx \frac{q \Lambda}{(s_{\text{ЛД}}(0,1 + \alpha))} = d$$