

## 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  $r = 2480\text{ кДж/кг}$ .

188 ≈ 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  $100^\circ\text{C}$  находятся в равновесии вода (молярная масса  $18\text{ г/моль}$ ), водяной пар и азот (молярная масса  $28\text{ г/моль}$ ). Объём жидкой воды много меньше объёма сосуда. Давление в сосуде составляет  $300\text{ кПа}$ , атмосферное давление  $100\text{ кПа}$ . Универсальная газовая постоянная  $8,3\text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$ . Абсолютный нуль температуры составляет  $-273^\circ\text{C}$ .

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  $0^\circ\text{C}$ ? Ответ представьте в килопаскалях и округлите до второй значащей цифры. Давление насыщенного пара воды при  $0^\circ\text{C}$  составляет  $0,6\text{ кПа}$ .

$$\boxed{\text{A) } 0,097; \text{ B) } 200; \text{ C) } 0,58; \text{ D) } 1,8; \text{ E) } 150}$$

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

$$\boxed{p_{\text{на}} 69,0 = \frac{0L}{L} 0d1L^0 = d}$$

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.

$$\boxed{r 18 \approx LH \frac{0dn}{m} = A}$$

ЗАДАЧА 6. (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.

$$\boxed{\frac{v}{V} = \frac{g}{g} - 1}$$

ЗАДАЧА 7. (МФТИ, 1996) В сосуде находятся водяной пар и вода при температуре  $100^\circ\text{C}$ . 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.

$$\boxed{161 \approx \frac{(1-g)0dn}{LH^d}}$$

ЗАДАЧА 8. («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  $\nu$  молей жидкости. Объём жидкости намного меньше объёма пара. Пар считать идеальным газом.

$$\Delta H^{\frac{1}{3}} = \nu$$

ЗАДАЧА 9. («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).

$$\Delta Q^{\frac{1}{2}} \approx \frac{\Delta H^{\frac{1}{2}}}{\Delta T^{\frac{1}{2}}} + \nu m = \nu m \quad (\nu : \Delta Q^{\frac{1}{2}} = \Delta H^{\frac{1}{2}} = \Delta T^{\frac{1}{2}})$$

ЗАДАЧА 10. («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.

$$\Delta Q = \frac{\Delta H^{\frac{1}{2}}}{(\Delta T^{\frac{1}{2}} - \Delta T^{\frac{1}{2}}) \nu} = m$$

ЗАДАЧА 11. (МФТИ, 1991) В цилиндре под поршнем находятся  $\nu$  молей жидкости и  $\nu$  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  $\Delta T$ . Найти изменение внутренней энергии содержимого цилиндра. Начальным объёмом жидкости пренебречь.

$$(\Delta T + \Delta T) \nu - \Delta T = \Delta T$$

ЗАДАЧА 12. (МФТИ, 1993) Для насыщенного водяного пара вблизи температуры  $100^\circ\text{C}$  малые относительные изменения давления  $\Delta p_n/p_n$  и температуры  $\Delta T_n/T_n$  связаны формулой  $\Delta p_n/p_n = 13\Delta T_n/T_n$ . 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/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К),  $T = 273$  К.

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

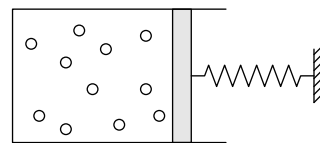
$$\Delta T = \frac{p(0) \mu g H}{13 R T} = 1,98^\circ\text{C}$$

ЗАДАЧА 13. (МФТИ, 1997) Насыщенный водяной пар находится в цилиндре под поршнем при температуре  $120^\circ\text{C}$ . 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?

$$A = \frac{p \Delta V}{\gamma} = 1,1 \text{ Дж} \quad m = 0,005 V \rho = 0,005 \cdot 4,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 = 0,0225 \text{ кг}$$

ЗАДАЧА 14. (МФТИ, 1997) В цилиндре поршнем с пружиной (см. рисунок) заперт водяной пар в объёме  $V = 4$  л. Температура в цилиндре поддерживается постоянной и равной  $100^\circ\text{C}$ . 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.

$$m = \frac{p \Delta V}{R T} = 3,6 \text{ г}$$

ЗАДАЧА 15. (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/см<sup>3</sup>, молярная масса пара  $\mu = 18$  г/моль.

$$\gamma = \frac{d \ln p}{d \ln T} = \frac{\mu g H}{R T}$$

ЗАДАЧА 16. (МФТИ, 2005) В цилиндре под поршнем находится насыщенный водяной пар и вода при температуре  $100^\circ\text{C}$ . 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/см<sup>3</sup>, молярная масса пара  $\mu = 18$  г/моль.

$$\beta = \left( \frac{d \ln p}{d \ln T} + 1 \right) \gamma = \frac{\mu g H}{R T}$$

Задача 17. (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  $\Delta T$  градусов. Сколько тепла было подведено к системе «жидкость–пар» в этом процессе? Молярная теплота испарения жидкости в заданном процессе равна  $\lambda$ . Внутренняя энергия  $\nu$  молей пара равна  $U = 3\nu RT$  ( $R$  — газовая постоянная).

$$Q = \lambda \nu + (L + \nu) \Delta T$$

Задача 18. (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  $\nu$  молями пара при расширении от объёма  $V_1$  до  $V_2$ , равна  $\nu RT \ln(V_2/V_1)$ .

$$Q = \nu L + \nu RT \ln k$$

Задача 19. (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  $\mu$ . Трением и теплоёмкостью поршня пренебречь. Считать, что объём жидкости значительно меньше объёма образовавшегося из неё пара.

$$Q = A + \mu \nu \Delta T$$

Задача 20. (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  $\Delta m$  испарилась?
- 2) Сколько тепла необходимо при этом отвести от гелия?

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

$$Q = \lambda \Delta m + \mu \nu \Delta T$$

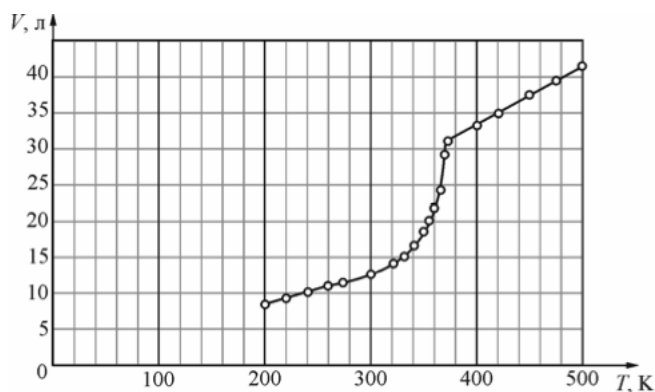
Задача 21. (МФТИ, 2007) Тонкий подвижный теплопроводящий поршень делит герметичный цилиндр объёмом 3,7 л на две части. В одной части находится вода, в другой — воздух при давлении  $p = 0,32$  атм. Начальная температура в цилиндре  $t_1 = 7^\circ\text{C}$ . При медленном нагревании поршень в некоторый 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  $20^\circ\text{C}$  равно  $p_{20} = 0,023$  атм. Силу тяжести и трение поршня о цилиндр не учитывать.

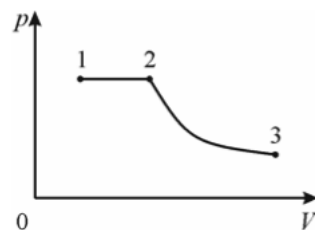
$$\Delta z \approx \left( \frac{1}{\rho} - \frac{z}{\rho_0} \right) \frac{\rho_0}{\rho} = u \quad (z: 0 \text{ (I)}$$

Задача 22. (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.



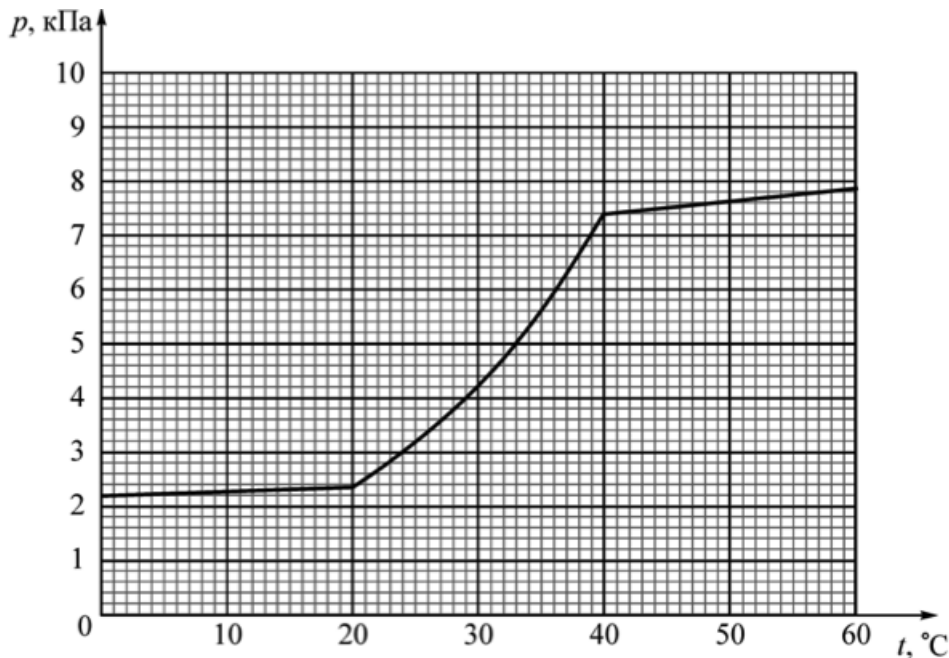
181

Задача 23. (МОШ, 2014, 11) В гладком цилиндре под подвижным поршнем находятся в равновесии  $\nu$  молей жидкости и  $\nu$  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.



$$\left( \frac{3}{2} R + r \right) \nu = \nu p \Delta V$$

Задача 24. (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  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

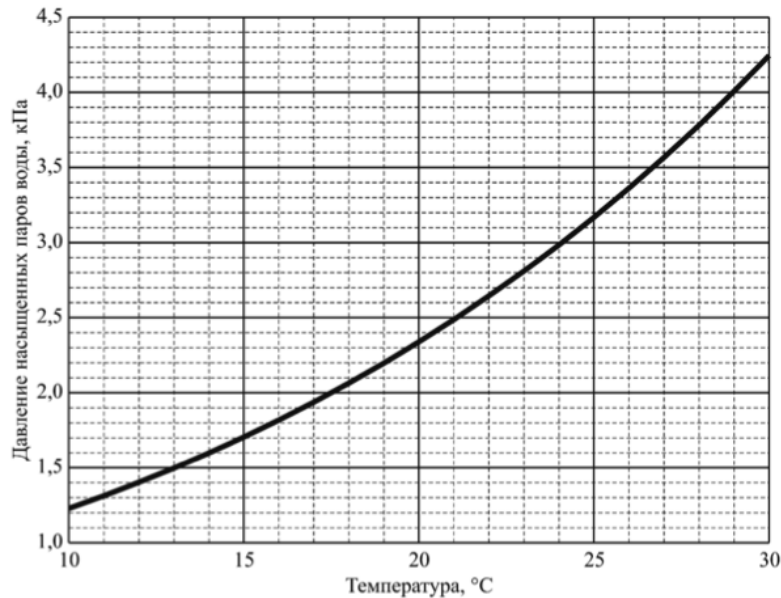


$$10,0 \pm 0,02 \text{ моль, } 1,87 \pm 0,01 \text{ моль}$$

Задача 25. (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  $1 \text{ К}$ ?

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



(1)  $p = 290 \text{ К} \cdot 2 \text{ г} = 3,6 \text{ кПа}$

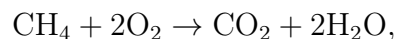
ЗАДАЧА 26. («Покори Воробьёвы горы!», 2017, 10–11) В закрытом с обоих концов цилиндре объёмом  $V = 2$  л свободно ходит невесомый тонкий поршень. В пространстве с одной стороны поршня вводится  $m_1 = 2$  г воды; с другой стороны поршня —  $m_2 = 1$  г азота. Найти отношение объёмов частей цилиндра при  $t = 100^\circ\text{C}$ . 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).

$\frac{28}{18} \approx 1,56$

ЗАДАЧА 27. («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  $\mu$  и удельную теплоту парообразования  $\lambda$  воды, а также универсальную газовую постоянную  $R$  и ускорение свободного падения  $g$  считать известными.

$\left(\frac{S^d}{b^d} - 1\right) \frac{Mg}{2\lambda} = \frac{1}{2} \frac{Q}{Q}$

ЗАДАЧА 28. («Покори Воробьёвы горы!», 2015, 10–11) Прочный баллон ёмкостью  $V = 20$  л заполнили смесью метана ( $\text{CH}_4$ ) и кислорода ( $\text{O}_2$ ) при температуре  $t_0 = 28^\circ\text{C}$ . В баллоне произвели маломощный разряд, вызвавший химическую реакцию

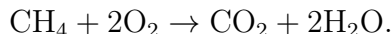


а затем остудили его содержимое до температуры  $t_1 = 100^\circ\text{C}$ . После этого на стенках сосуда выступили мелкие капельки воды общей массой  $m = 1$  г, а давление в баллоне стало равно  $p = 1,775 \cdot 10^5$  Па. Найти давление в баллоне до начала реакции. Какими могли быть массы газов, закаченных 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).

$p_0 = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}; 5,6 \text{ г метана и } 22,4 \text{ г кислорода}$



ЗАДАЧА 29. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) В очень прочном баллоне объемом  $V = 50$  л находится 96 г смеси метана  $\text{CH}_4$  с кислородом  $\text{O}_2$ . 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.

$$p_2 \approx p_0 \left( \frac{V_2}{V_1} + \alpha \right)$$

ЗАДАЧА 30. («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. Смесь 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).

$$m \approx \frac{p_0 V_0}{R(t_0 - t_2)} - \frac{p_{\text{н}} V_0}{R(t_0 - t_2)} = m_{\text{ж}}$$

ЗАДАЧА 31. (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  $C_V = 3R$ .

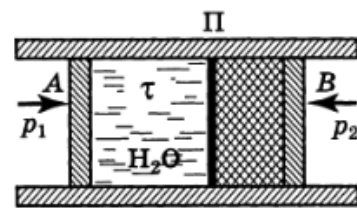
Молярной теплотой парообразования при некоторой температуре  $T$  называется количество теплоты, необходимое для превращения одного моля воды в пар в двухфазной системе «вода — насыщенный пар» при постоянной температуре  $T$ .

$$L_2 = L_1 + C(T_2 - T_1)$$

ЗАДАЧА 32. (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  $\Delta T$  насыщенного пара его давление изменяется на  $\Delta p = k\Delta T$ , где  $k = 2 \cdot 10^2$  Па/К.

$$\Delta m \approx \frac{L}{L + T} \Delta T = m \Delta T$$

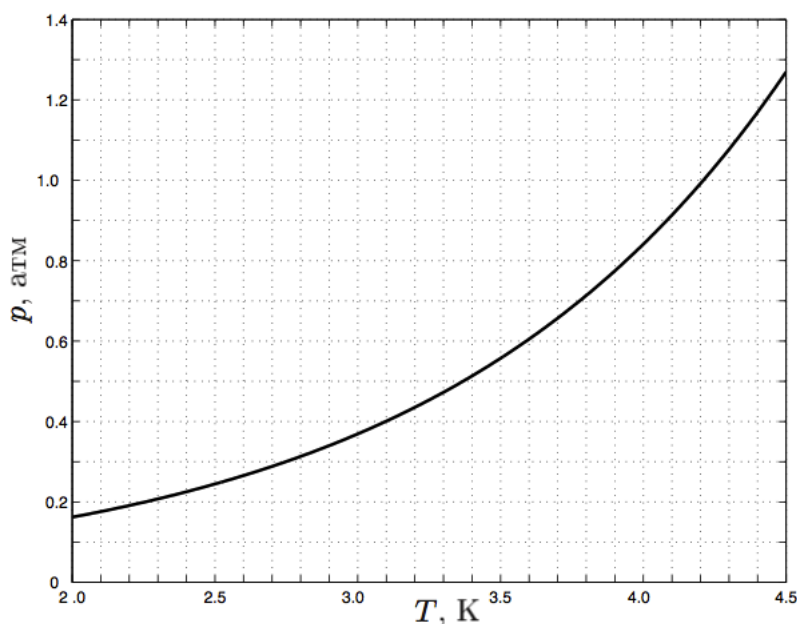
ЗАДАЧА 33. (Всеросс., 1995, финал, 10) Теплоизолированная труба разделена на два отсека неподвижной перегородкой П с многочисленными тончайшими отверстиями (порами) и закрыта с обоих концов подвижными и теплоизолированными поршнями А и В. В начальный момент между поршнем А и перегородкой находится при 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.



$$\eta = \frac{m \lambda}{m c_v \Delta T} = \nu$$

ЗАДАЧА 34. (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.



$$T = 3,25 \pm 0,05 \text{ K}$$

ЗАДАЧА 35. (Всеросс., 2003, ОЭ, 11) Герметичный сосуд состоит из двух одинаковых шаров объёмом  $V = 5 \text{ м}^3$  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  $S = 3 \text{ см}^2$ . При каких температурах  $T_0$  воды и пара возможна такая ситуация, что при малых изменениях  $\Delta T_0$  этой температуры поршень смещается в одну и ту же сторону от положения равновесия независимо от знака  $\Delta T_0$ ?



*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  $\mu = 18 \text{ г/моль}$ , удельная теплота парообразования  $\lambda = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ , универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ .

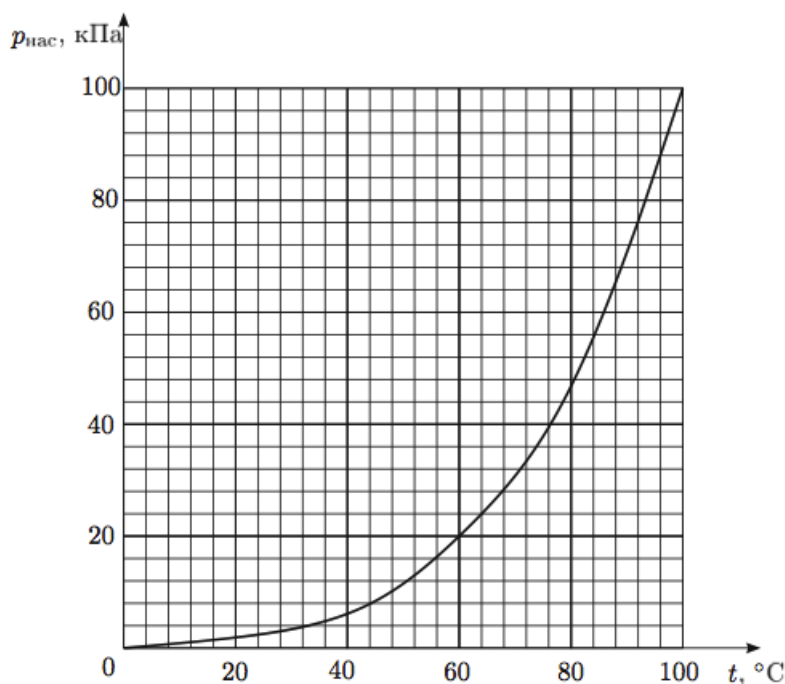
$$\chi \text{ осэ} = \frac{(\lambda^6 + S\chi)H}{\lambda^6 H \chi} = \text{оL}$$

ЗАДАЧА 36. (Всеросс., 2002, ОЭ, 11) В откачанный цилиндрический сосуд с поршнем впрыснули некоторое количество воды. Содержимое сосуда довели до равновесного состояния с температурой  $t_1 = 76^\circ\text{C}$ , при этом объём сосуда составил  $V_1 = 50 \text{ л}$ . 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  $m/\mu$  — количество молей газа,  $T$  — температура газа,

$R$  — универсальная газовая постоянная.

$$T_{\text{max}} = T = 349 \text{ K}; \quad \rho = m \left( \frac{p}{R T} \right) = \frac{p M}{R T} = 19 \text{ г/л}; \quad V = \frac{m}{\rho} = \frac{1 \text{ кг}}{19 \text{ г/л}} \approx 0,053 \text{ л}$$