

XIV Всероссийская летняя школа учителей физики

Водяные пары и влажный воздух в задачах олимпиад

Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
старший преподаватель Шевцов Владислав Сергеевич

июнь-июль 2026 года

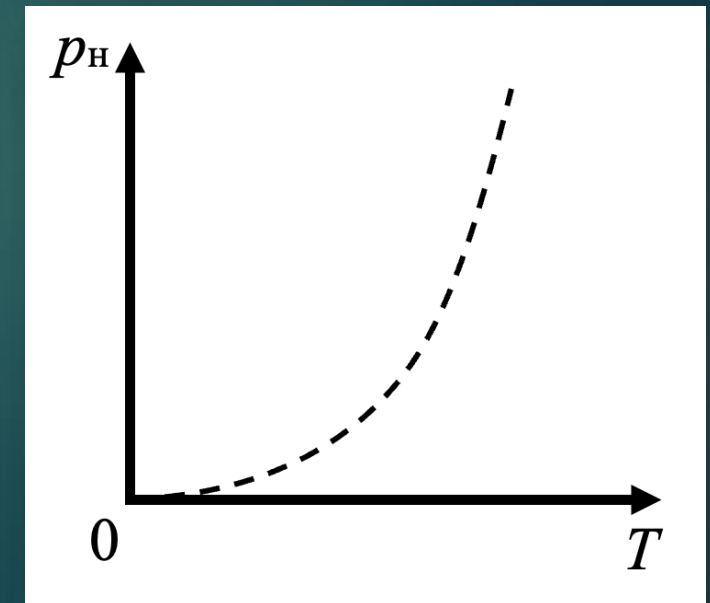
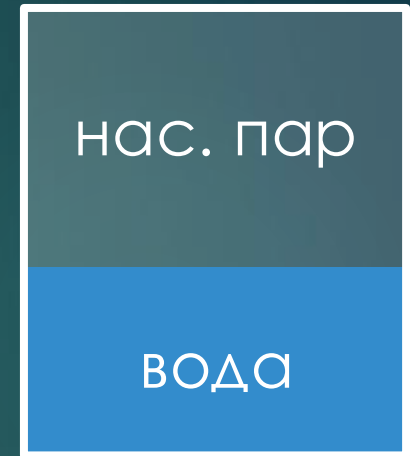
Насыщенный и ненасыщенный пар

2

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называется **насыщенным**.

Относительной влажностью воздуха называется отношение парциального давления p пара в воздухе к давлению p_H насыщенного пара при той же температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_H}$$



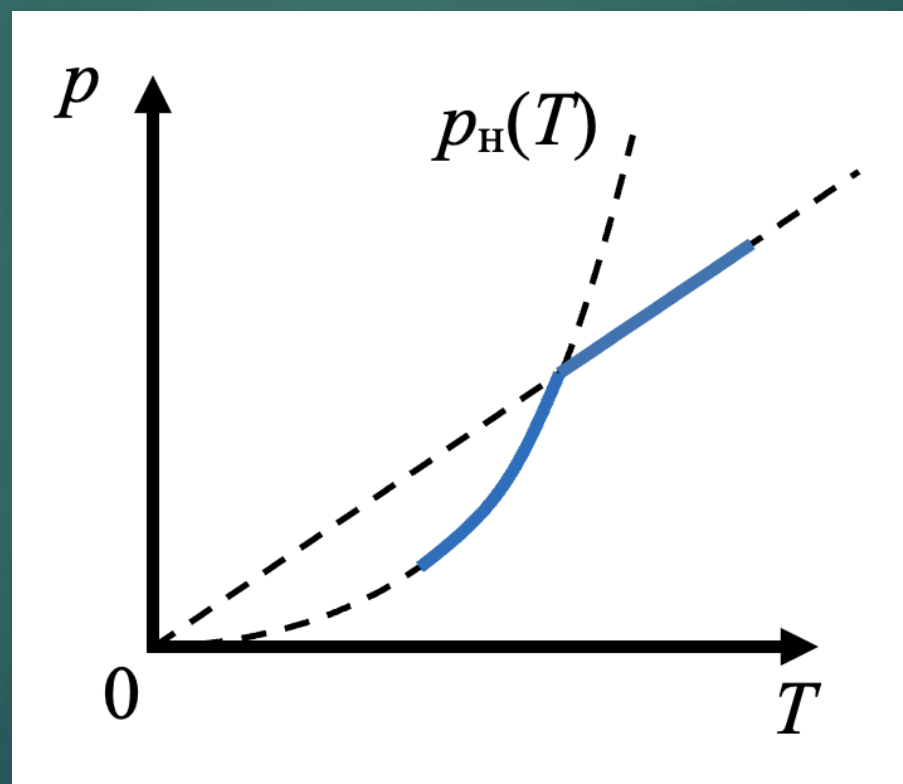
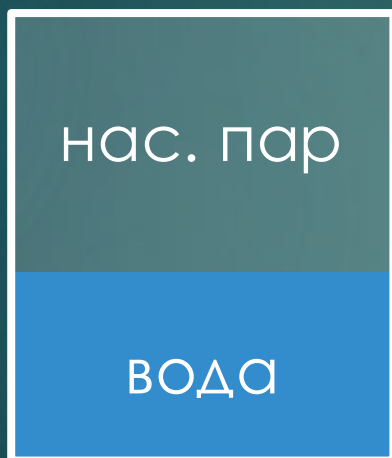
$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-5	0,40	3,2	14	1,60	12,1
0	0,61	4,8	15	1,71	12,8
1	0,65	5,2	16	1,81	13,6
2	0,71	5,6	17	1,94	14,5
3	0,76	6,0	18	2,07	15,4
4	0,81	6,4	19	2,20	16,3
5	0,88	6,8	20	2,33	17,3
6	0,93	7,3	21	2,49	18,3
7	1,0	7,8	25	3,17	23,0
8	1,06	8,3	50	12,3	83,0
9	1,14	8,8	60	19,9	129,4
10	1,23	9,4	70	31,0	195,7
11	1,33	10,0	80	47,3	290,2
12	1,40	10,7	90	70,0	417,6
13	1,49	11,4	100	101,3	588,3

Зависимость давления p и плотности ρ насыщенного пара от температуры T

Сценарий 1

4

Вода и пар в герметичном сосуде постоянного объема

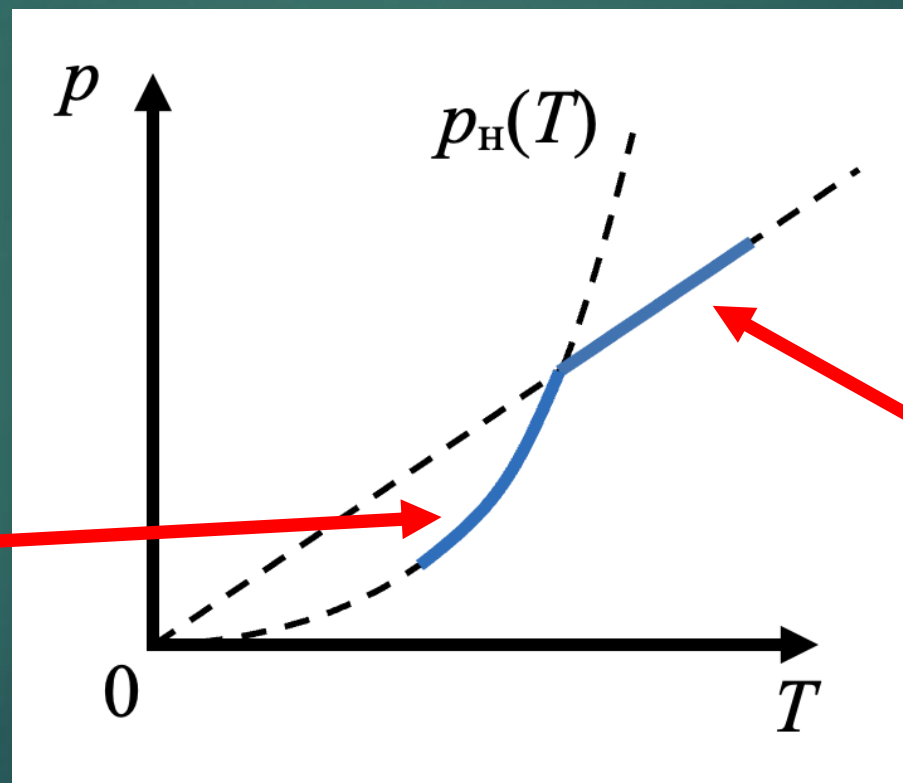


$$p = nkT$$

Сценарий 1

5

Вода и пар в герметичном сосуде постоянного объема



$$p = nkT$$

Задача 1*

При понижении температуры воздуха в замкнутом сосуде объема $V = 1 \text{ м}^3$ от $t_1 = 25 \text{ °C}$ до $t_2 = 11 \text{ °C}$ сконденсировалось $\Delta m = 8,4 \text{ г}$ воды. Какова относительная влажность воздуха φ ?

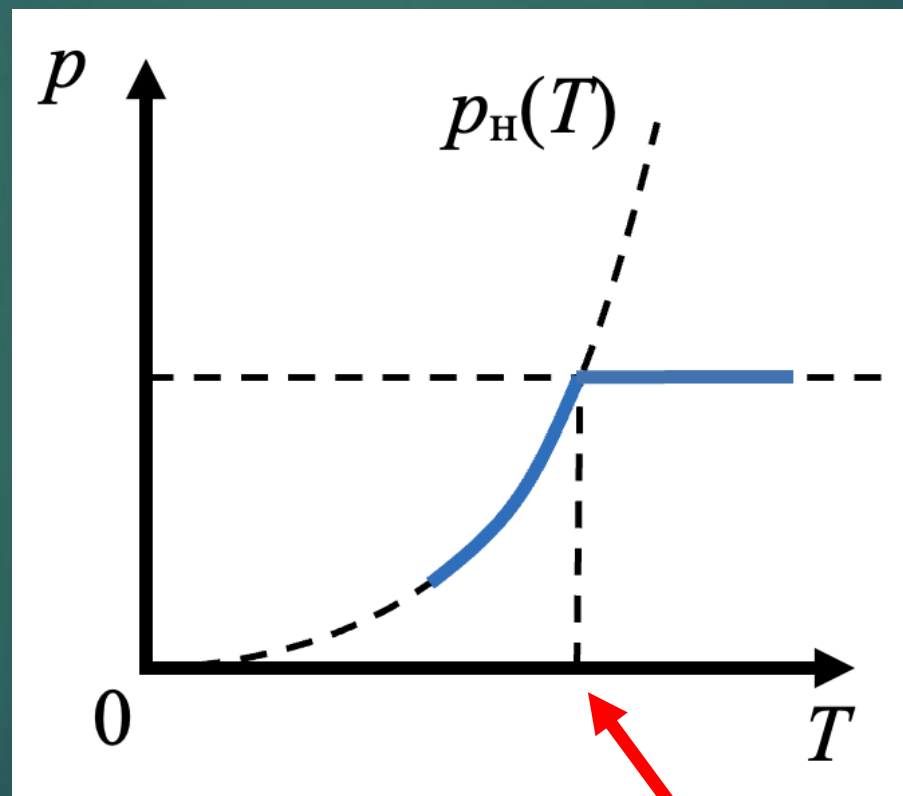
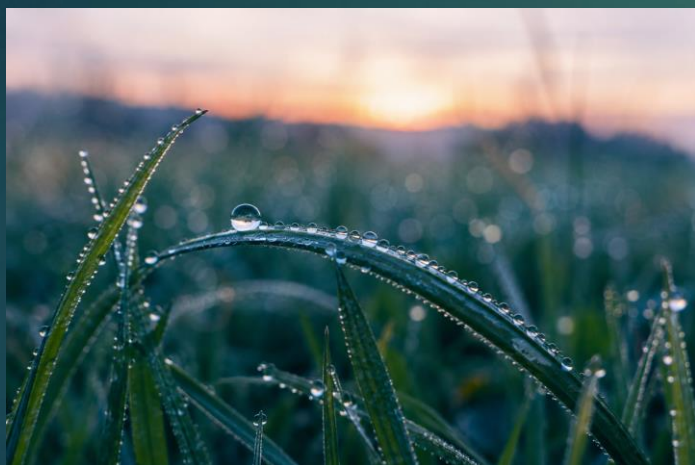
$t, \text{ °C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$	$t, \text{ °C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$
-5	0,40	3,2	14	1,60	12,1
0	0,61	4,8	15	1,71	12,8
1	0,65	5,2	16	1,81	13,6
2	0,71	5,6	17	1,94	14,5
3	0,76	6,0	18	2,07	15,4
4	0,81	6,4	19	2,20	16,3
5	0,88	6,8	20	2,33	17,3
6	0,93	7,3	21	2,49	18,3
7	1,0	7,8	25	3,17	23,0
8	1,06	8,3	50	12,3	83,0
9	1,14	8,8	60	19,9	129,4
10	1,23	9,4	70	31,0	195,7
11	1,33	10,0	80	47,3	290,2
12	1,40	10,7	90	70,0	417,6
13	1,49	11,4	100	101,3	588,3

Задача 2

В кастрюлю-скороварку залили небольшое количество воды при температуре $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, причём занимаемый водой объём намного меньше объёма кастрюли. После этого её герметично закрыли крышкой и медленно нагрели. Когда температура в кастрюле достигла $t_1 = 115 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление — трёх атмосфер, вся вода испарилась. Оценить по этим данным, какую часть объёма кастрюли занимала вода до начала нагрева. Давлением водяных паров в кастрюле при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ можно пренебречь. Плотность воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

Сценарий 2

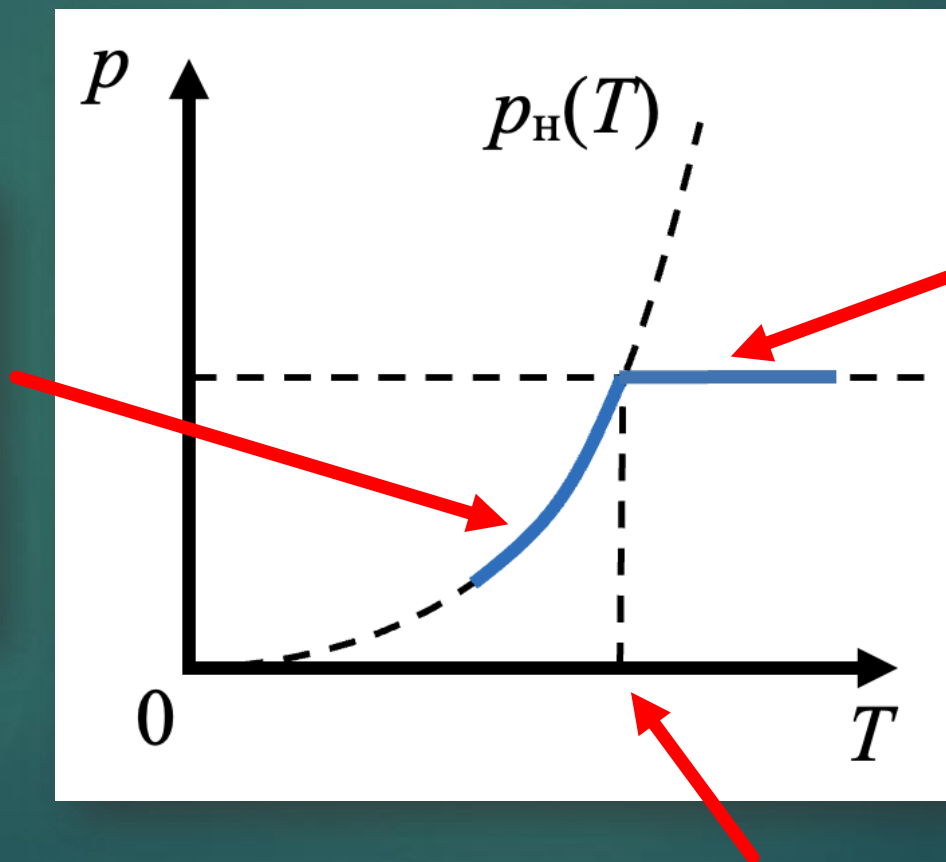
Влажный воздух в атмосфере



Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называется **точкой росы**.

Сценарий 2

Влажный воздух в атмосфере



Температура, при которой пар, находящийся в воздухе, становится насыщенным, называется **точкой росы**.

Задача 3*

Температура воздуха в комнате $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Относительная влажность составляет $\varphi = 60 \%$. При какой температуре t_2 воздуха за окном начнут запотевать оконные стекла?

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$
-5	0,40	3,2	14	1,60	12,1
0	0,61	4,8	15	1,71	12,8
1	0,65	5,2	16	1,81	13,6
2	0,71	5,6	17	1,94	14,5
3	0,76	6,0	18	2,07	15,4
4	0,81	6,4	19	2,20	16,3
5	0,88	6,8	20	2,33	17,3
6	0,93	7,3	21	2,49	18,3
7	1,0	7,8	25	3,17	23,0
8	1,06	8,3	50	12,3	83,0
9	1,14	8,8	60	19,9	129,4
10	1,23	9,4	70	31,0	195,7
11	1,33	10,0	80	47,3	290,2
12	1,40	10,7	90	70,0	417,6
13	1,49	11,4	100	101,3	588,3

Задача 4*

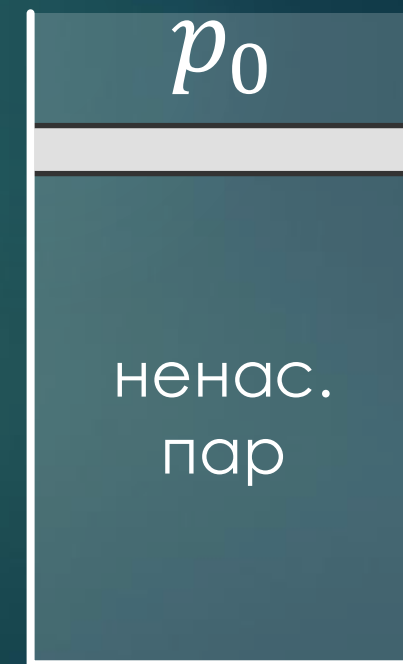
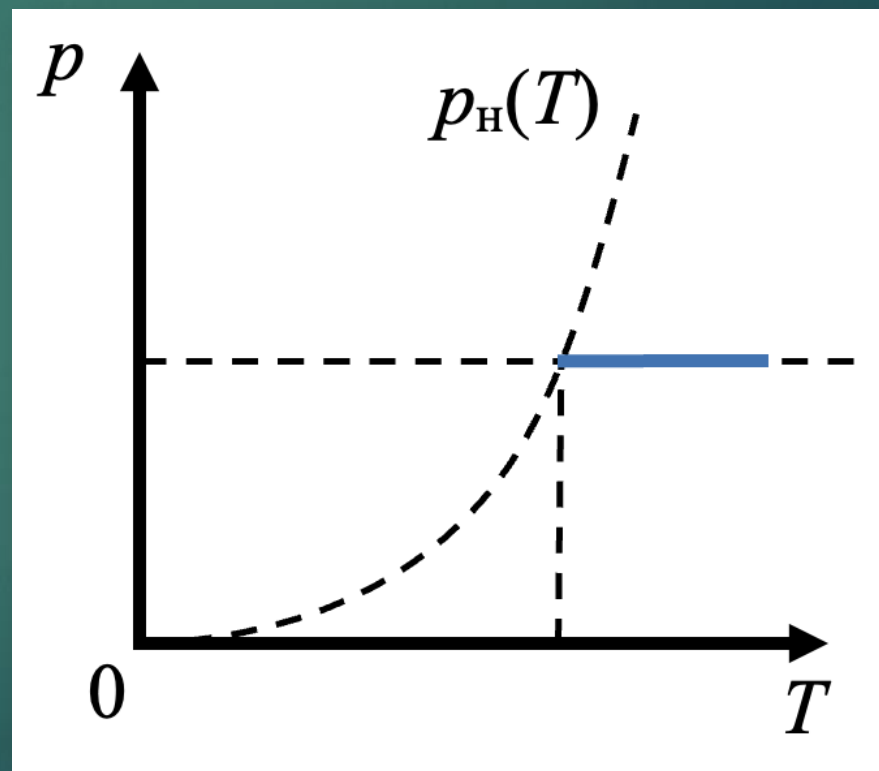
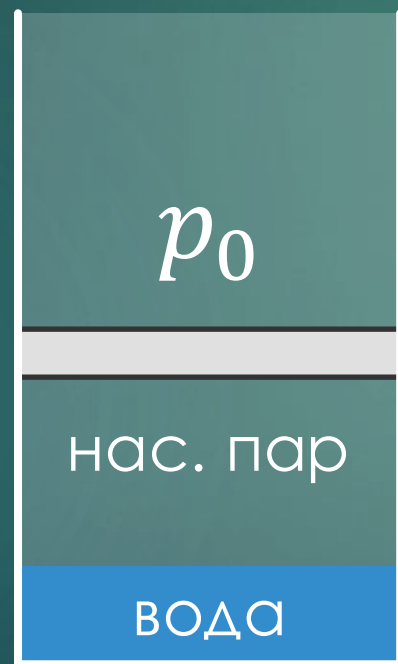
Температура воздуха вечером была $t_1 = 18 \text{ }^\circ\text{C}$, относительная влажность $\varphi = 65 \%$. Ночью температура воздуха понизилась до $t_2 = 9 \text{ }^\circ\text{C}$. Была ли роса? Если была, то сколько водяного пара сконденсировалось из 1 м^3 воздуха? Молярная масса воды $\mu = 0,018 \text{ кг/моль}$.

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$p, \text{ кПа}$	$\rho, \text{ г/м}^3$
-5	0,40	3,2	14	1,60	12,1
0	0,61	4,8	15	1,71	12,8
1	0,65	5,2	16	1,81	13,6
2	0,71	5,6	17	1,94	14,5
3	0,76	6,0	18	2,07	15,4
4	0,81	6,4	19	2,20	16,3
5	0,88	6,8	20	2,33	17,3
6	0,93	7,3	21	2,49	18,3
7	1,0	7,8	25	3,17	23,0
8	1,06	8,3	50	12,3	83,0
9	1,14	8,8	60	19,9	129,4
10	1,23	9,4	70	31,0	195,7
11	1,33	10,0	80	47,3	290,2
12	1,40	10,7	90	70,0	417,6
13	1,49	11,4	100	101,3	588,3

Сценарий 3

12

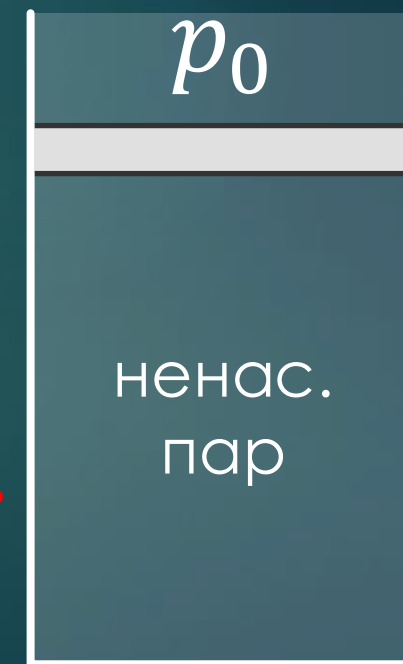
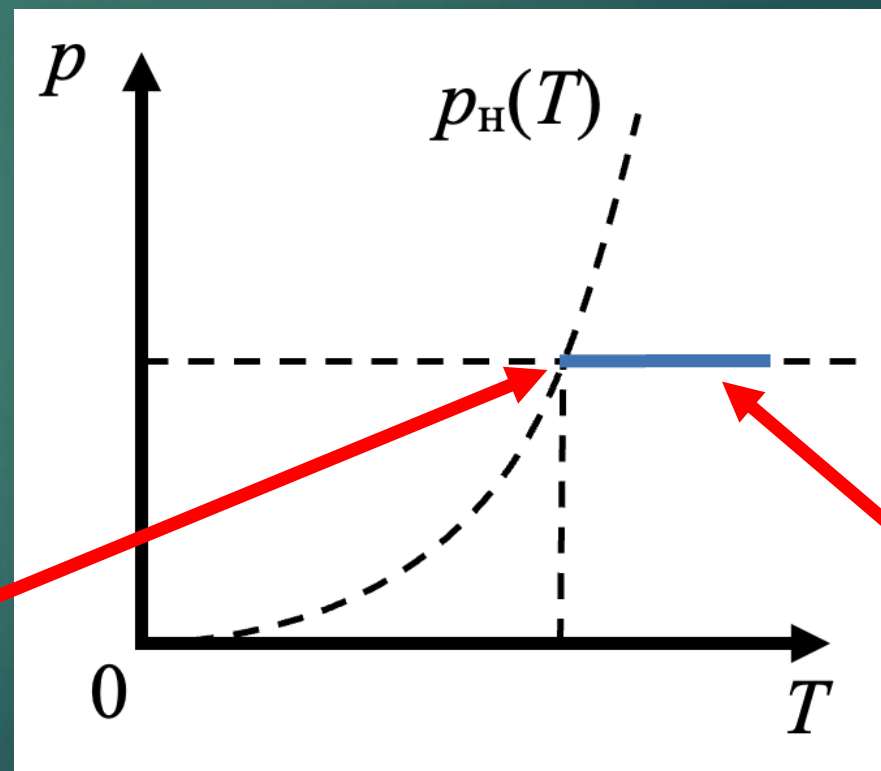
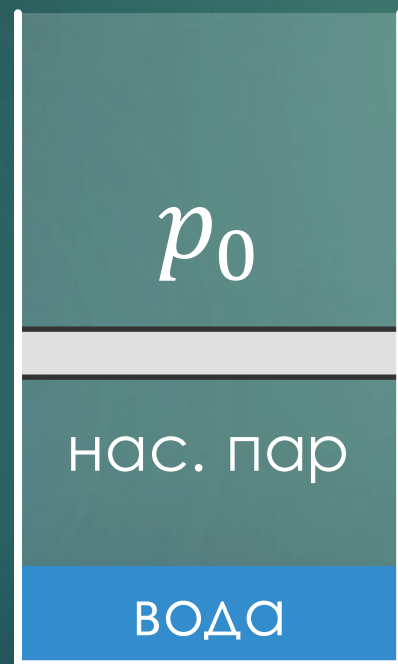
Вода и пар под свободным поршнем



Сценарий 3

13

Вода и пар под свободным поршнем



Задача 5

В цилиндре под поршнем площадью $S = 0,01 \text{ м}^2$ находится $\nu = 1$ моль воды при $t_1 = 0 \text{ °С}$. Цилиндр нагревается до $t_2 = 200 \text{ °С}$. На какую высоту поднимется поршень? Масса поршня $m = 100 \text{ кг}$. Первоначально поршень соприкасался с водой. Атмосферное давление нормальное. Давление насыщенных водяных паров при $t_2 = 200 \text{ °С}$ $p_{\text{н}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ Па}$, молярная масса воды $\mu = 0,018 \text{ кг/моль}$, плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$. Поршень в цилиндре перемещается без трения.

Задача 6

15

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.

Задача 7*

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.

Задача 8

17

Под невесомым поршнем в цилиндре находится $m = 1$ кг воды при температуре $t_1 = 0$ °С. В воду опускают кусок железа массы $m_0 = 1$ кг, нагретый до температуры $t_2 = 1100$ °С. На какую высоту h поднимется поршень? Удельная теплоёмкость железа $c_0 = 500$ Дж/(кг·К), удельная теплота парообразования воды $L = 2,3$ МДж/кг. Площадь поршня $S = 1000$ см². Теплоёмкостью цилиндра и потерями тепла пренебречь.

Задача 9*

18

В вертикально расположенном цилиндре под невесомым поршнем сечения $S = 100 \text{ см}^2$ находится $m = 18 \text{ г}$ насыщенного водяного пара. В цилиндр впрыскивают $M = 18 \text{ г}$ воды при температуре $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{С}$. На какую высоту Δh опустится поршень?

Задача 10*

19

В теплоизолированном цилиндре с гладкими стенками под лёгким поршнем находится вода массой $m = 5,5$ г при температуре $t_0 = 0$ °С. Площадь поршня $S = 500$ см², наружное давление $p_0 = 1,0 \cdot 10^5$ Па. К содержимому цилиндра медленно подводят теплоту, вода начинает кипеть.

- Какое количество теплоты Q_1 подвели к воде до начала кипения?

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

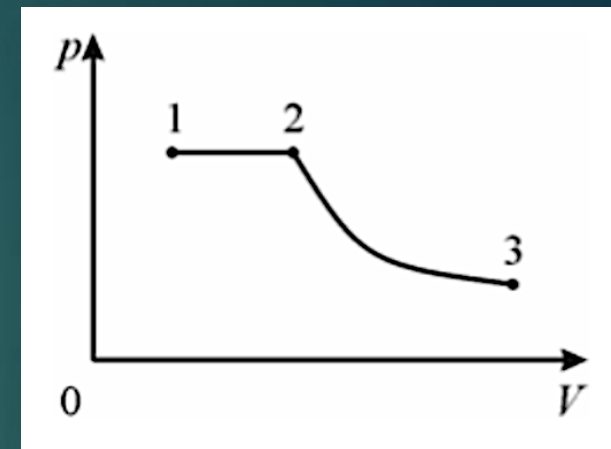
- Найдите перемещение H поршня в процессе подведения теплоты.

Удельная теплоёмкость воды $c = 4180$ Дж/(кг·К). Удельная теплота парообразования воды при $t = 100$ °С $L = 2,26 \cdot 10^6$ 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.

Задача 11*

20

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.

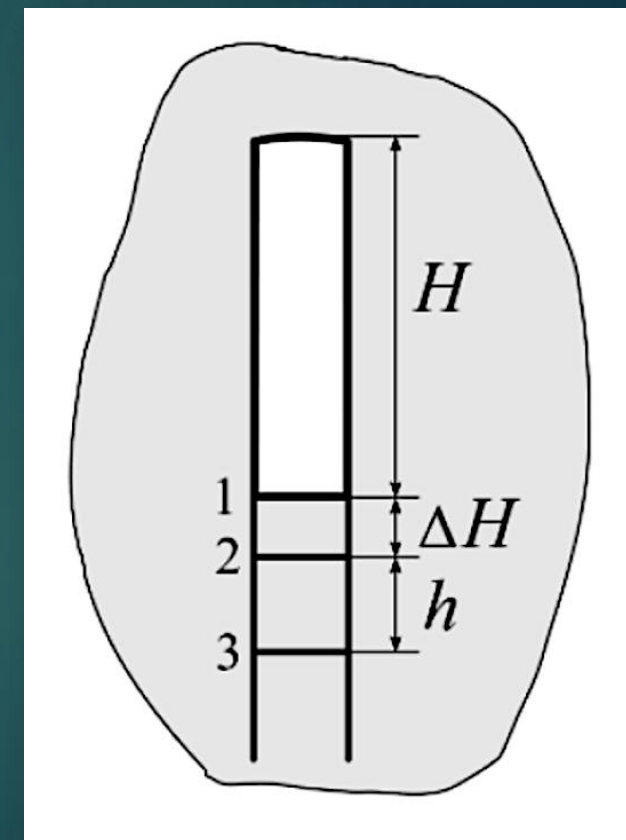
Задача 12

21

В воде на некоторой глубине удерживают пробирку в вертикальном положении, обращенную открытым концом вниз. Столб влажного воздуха имеет длину $H = 8$ см, температура установилась равной $t_1 = 27$ °С, в таком состоянии пробирка находилась достаточно долго. В некоторый момент температуру системы резко поднимают до температуры $t_2 = 57$ °С, сохраняя прежнее давление. При этом вода в пробирке быстро опустилась с уровня 1 до уровня 2. После этого уровень воды начал медленно двигаться до уровня 3, опустившись на $h = 10,3$ мм. Изменением гидростатического давления на границе «воздух–вода» в пробирке можно пренебречь.

- Найти расстояние ΔH между первым и вторым уровнями.
- Найти давление в пробирке p_0 . Ответ дать в мм рт. ст.

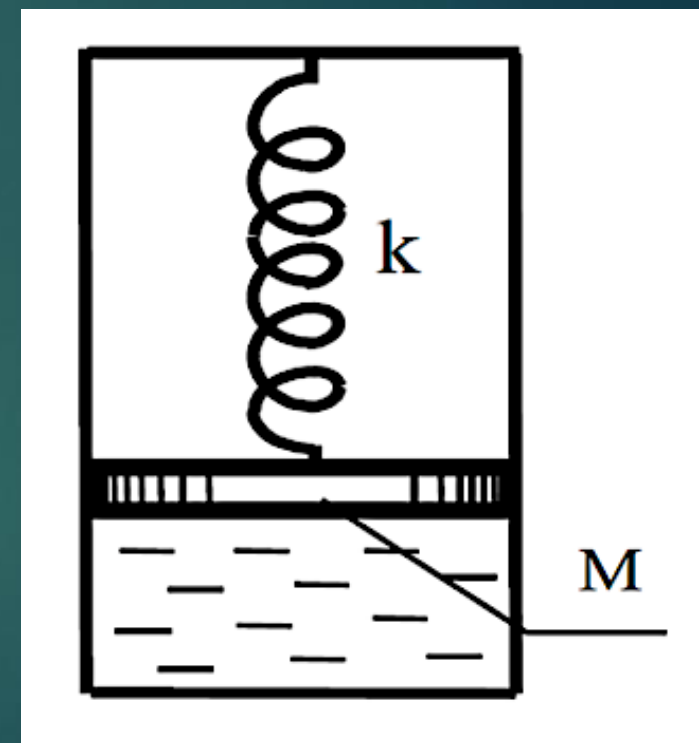
Давление насыщенного пара воды при температуре t_1 равно $p_{н1} = 27$ мм рт. ст., при температуре t_2 равно $p_{н2} = 130$ мм рт. ст.



Задача 13*

22

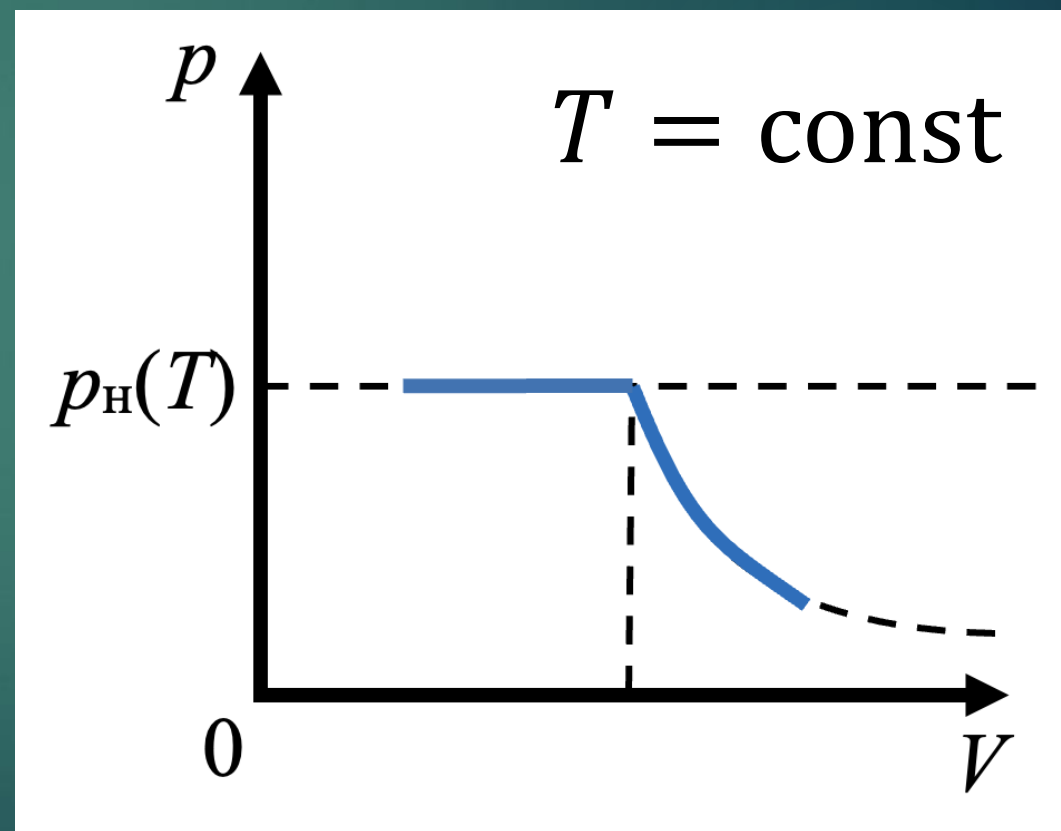
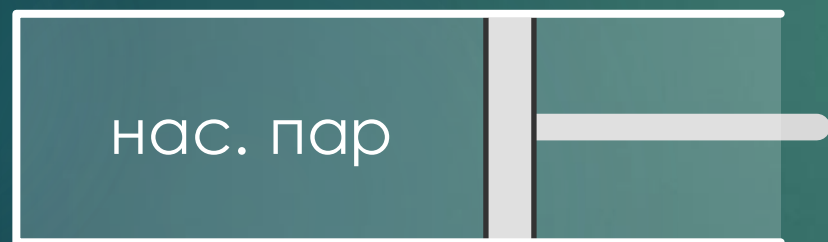
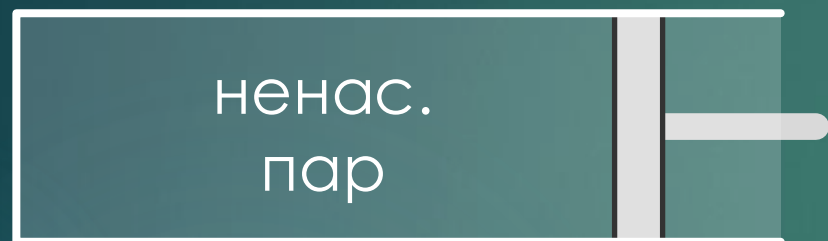
Замкнутый вертикально расположенный цилиндрический сосуд сечением $S = 20 \text{ см}^2$ разделён поршнем массы $M = 5 \text{ кг}$ на две части. Нижняя часть цилиндра под поршнем целиком заполнена водой при начальной температуре $t_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, над поршнем — вакуум. Поршень связан с верхним основанием цилиндра пружиной жёсткости $k = 15 \text{ Н/м}$. Вначале пружина не деформирована. Определите массу m пара под поршнем при нагревании воды до температуры $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Трением и массой пружины пренебречь.



Сценарий 4

23

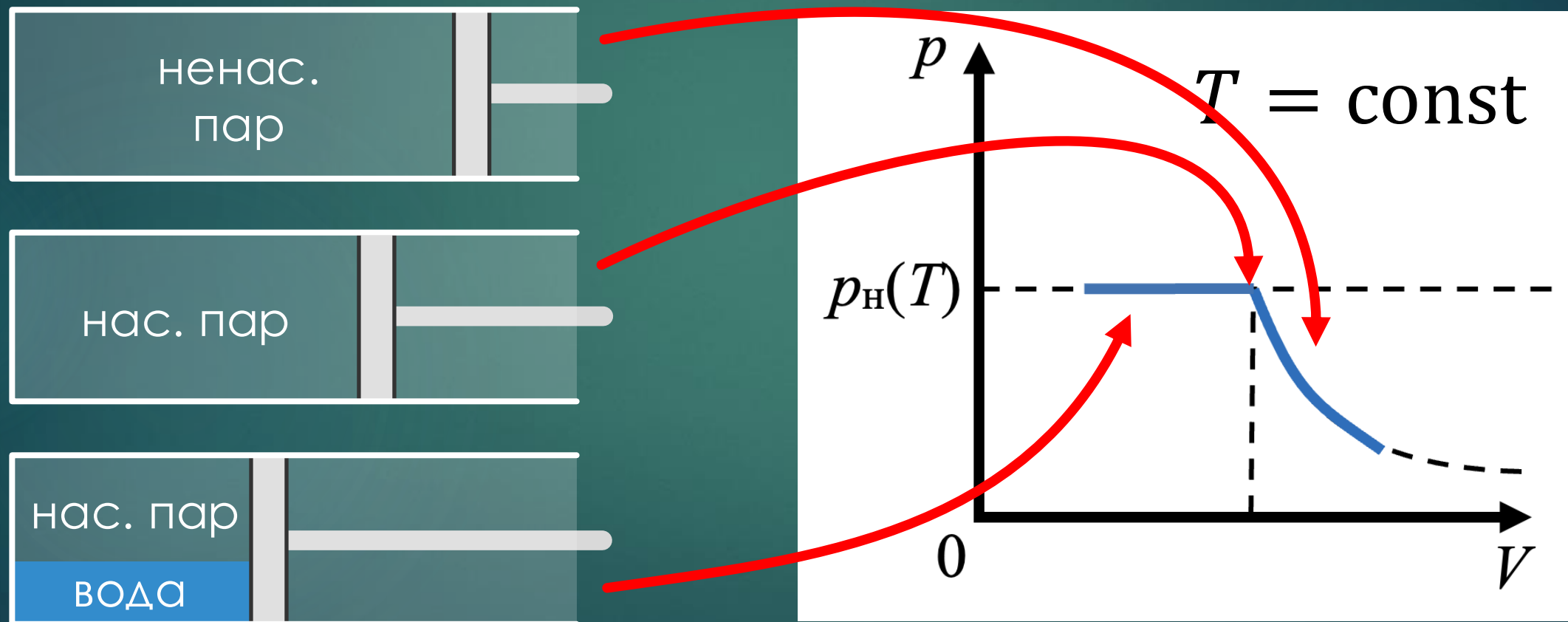
Вода и пар под поршнем при постоянной температуре



Сценарий 4

24

Вода и пар под поршнем при постоянной температуре



Задача 14*

25

В сосуде объемом $V_0 = 3$ л находится насыщенный водяной пар при температуре $t = 100$ °С. До какого объема V_1 нужно сжать пар при постоянной температуре, чтобы в сосуде образовалась вода массой $m = 1$ г? Нормальное атмосферное давление $p_0 = 10^5$ Па. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль·К). Молярная масса воды $\mu = 0,018$ кг/моль. Ответ приведите в литрах.

Задача 15

26

Поршень делит объем горизонтального герметичного цилиндра на две равные части, в каждой из которых находятся 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 $Mg/S = 0,01p_0$, здесь p_0 — нормальное атмосферное давление.

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

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

Задача 16*

27

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, отведённой от пара, от количества теплоты, сообщённого гелию? Молярную массу μ и удельную теплоту парообразования L воды, а также универсальную газовую постоянную R и ускорение свободного падения g считать известными.

Задача 17

28

В сосуде находится влажный воздух. При изотермическом сжатии его объём уменьшился в 5 раз, а давление увеличилось в 3 раза. При дальнейшем изотермическом сжатии в 3 раза давление в итоге стало в 7 раз больше первоначального. Какую относительную влажность φ имел воздух до начала сжатия?

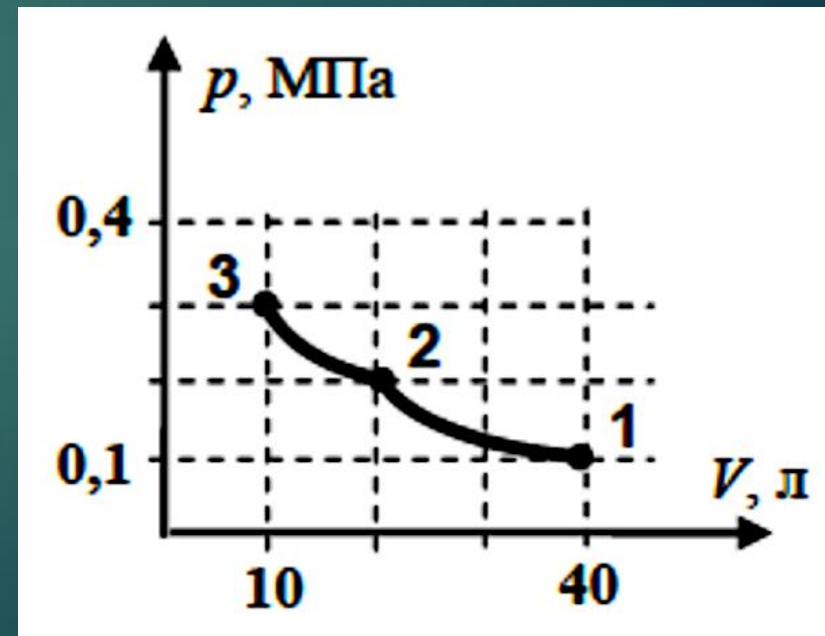
Задача 18

29

На pV -диаграмме показан участок изотермы, полученной при сжатии влажного воздуха в сосуде с непроницаемыми стенками под подвижным поршнем.

- Найти температуру изотермы.
- Определить массы сухого воздуха и воды в сосуде.

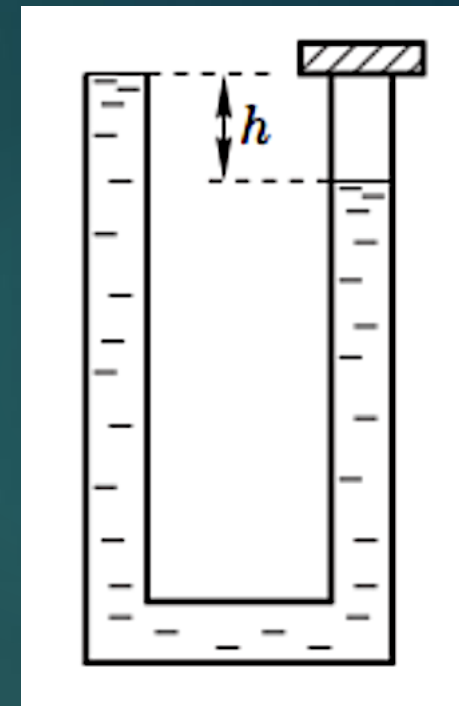
Считать, что нормальное атмосферное давление $p_0 \approx 100$ кПа. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль·К). Считать молярные массы веществ известными: $\mu_1 = 18$ г/моль, $\mu_2 = 29$ г/моль.



Задача 19*

30

Одно колено высокой симметричной U-образной трубки, имеющей площадь поперечного сечения S , открыто в атмосферу, а второе — наглухо закрыто. Трубка заполнена жидкостью плотностью ρ , причём в открытом колене уровень жидкости доходит до краёв, а в закрытом — на h ниже из-за оставшегося под крышкой воздуха. Трубку нагревают от начальной комнатной температуры T_1 до температуры T_2 кипения жидкости при атмосферном давлении p_0 .



Найдите объём ΔV жидкости, вылившейся из открытого колена к моменту закипания, если известно, что уровень жидкости в закрытом колене остался выше горизонтального участка трубы. Испарением жидкости из открытого колена в процессе нагревания и давлением насыщенных паров жидкости при комнатной температуре можно пренебречь.

Задача 20*

31

В откачанный сосуд вместимостью $V = 500 \text{ см}^3$ ввели водород до давления $p_{\text{в}} = 26,6 \text{ кПа}$ при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$. В другой такой же сосуд ввели кислород до давления $p_{\text{к}} = 13,3 \text{ кПа}$ при той же температуре. Оба сосуда соединили и, после того как газы перемешались, пропустили электрическую искру, гремучая смесь сгорела. Какая масса воды сконденсировалась на стенках сосуда после того, как установка приняла первоначальную температуру? Давление насыщенного пара воды при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ $p = 2,3 \text{ кПа}$.

Задача 21*

32

В откачанный цилиндрический сосуд с поршнем впрыснули некоторое количество воды. Содержимое сосуда довели до равновесного состояния с температурой $t_1 = 76 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом объём сосуда составил $V_1 = 50 \text{ л}$. Далее с содержимым сосуда совершают квазистатический круговой цикл, состоящий из:

- изотермического расширения до объёма $V_2 = 3V_1$, в результате которого давление в сосуде уменьшается в два раза;
- изобарического сжатия до объёма $V_3 = 3/2 V_1$;
- изотермического сжатия до объёма $V_4 = V_1$;
- изохорического нагревания до начальной температуры.

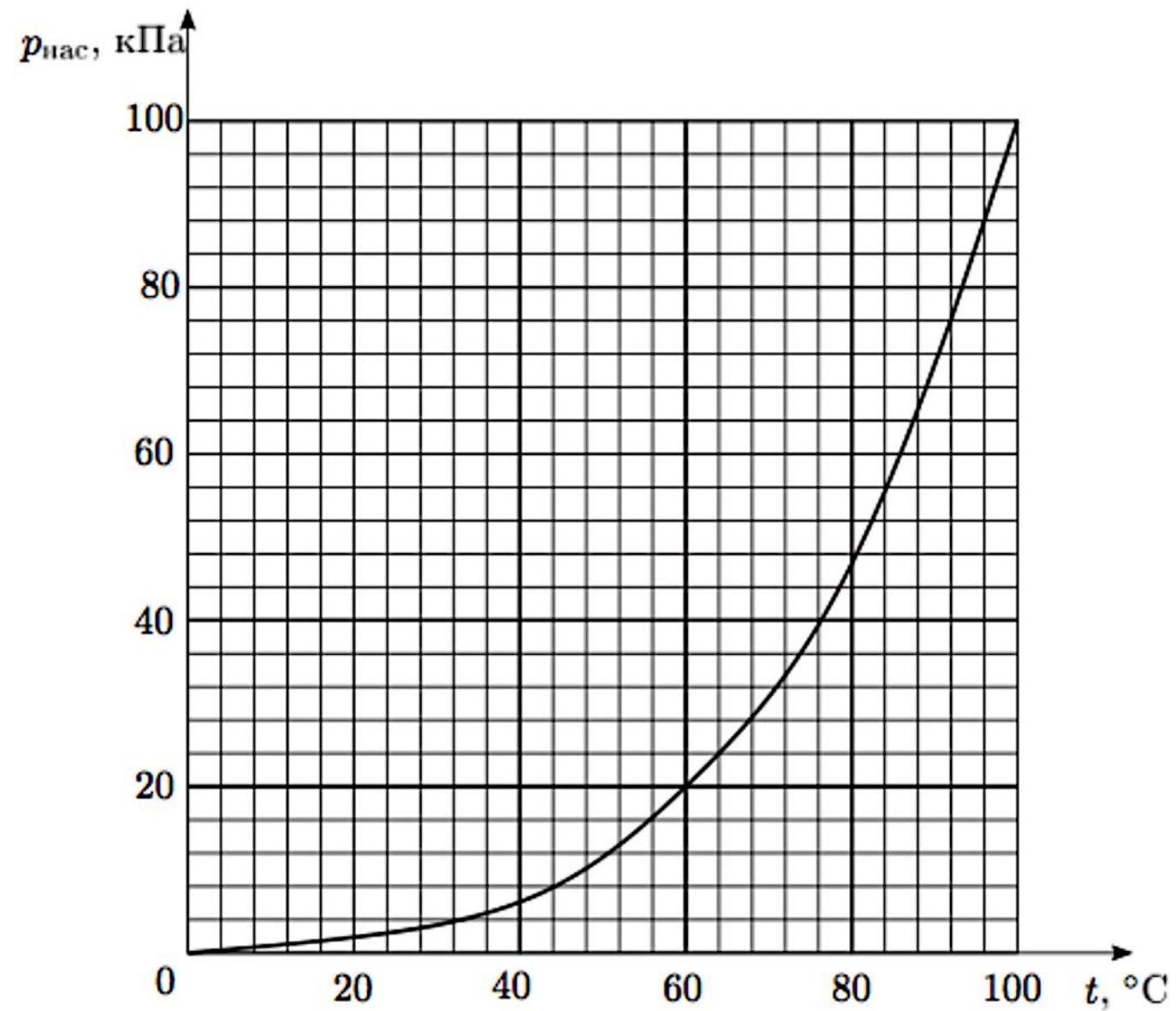
**СМ. ГРАФИК
НА СЛЕДУЮЩЕМ СЛАЙДЕ**



Принимая во внимание зависимость давления насыщенных паров воды от температуры, найдите:

- максимальную и минимальную температуры в цикле;
- массу воды, впрыснутой в сосуд;
- работу, совершённую системой в цикле.

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 газа, T — температура газа, R — универсальная газовая постоянная.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

ОТВЕТЫ НА СЛЕДУЮЩЕМ СЛАЙДЕ

Задача 1	$\varphi = \frac{T_1}{p_{H1}} \left(\frac{p_{H2}}{T_2} + \frac{\Delta m R}{\mu V} \right) \approx 80 \%$
Задача 2	$\frac{V_0}{V} = \frac{\mu}{\rho R} \left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_0}{T_0} \right) \approx 9,4 \cdot 10^{-4}$
Задача 3	$t_2 = 12 \text{ } ^\circ\text{C}$
Задача 4	$\Delta m = \frac{\mu V}{R} \left(\frac{\varphi p_{H1}}{T_1} - \frac{p_{H2}}{T_2} \right) \approx 1,3 \text{ г}$
Задача 5	$H - h = \frac{\nu R T_2}{p_0 S + mg} - \frac{\nu \mu}{\rho S} \approx 2 \text{ м}$
Задача 6	$A = \frac{8}{7} \nu R T$
Задача 7	$\Delta U = Q - \nu R (T_0 + 2\Delta T)$
Задача 8	$h = \frac{RT}{\mu p_0 S L} [c_0 m_0 (T_2 - T) - cm(T - T_1)] \approx 60 \text{ см}$
Задача 9	$\Delta h = \frac{cM(T - T_0)RT}{L\mu p_0 S} \approx 57 \text{ см}$
Задача 10	$Q_1 = cm(t - t_0) \approx 2300 \text{ Дж}$ $H = \frac{mRT}{\mu p_0 S} + \frac{R(Q_2 - Lm)}{\mu p_0 S c_p} \approx 0,4 \text{ м}$
Задача 11	$Q_{12} = \nu \left(r + \frac{16}{3} RT_3 \right)$

Задача 12	$\Delta H = H \frac{T_2 - T_1}{T_1} = 8 \text{ мм}$ $p_0 = p_{\text{H2}} + (p_{\text{H2}} - p_{\text{H1}}) \frac{H + \Delta H}{h} = 1010 \text{ мм рт. ст.}$
Задача 13	$m = \frac{p_0 \mu S}{RT} \cdot \frac{p_0 S - Mg}{k} \approx 11,7 \text{ г}$
Задача 14	$V_1 = V_0 - \frac{mRT}{\mu p_0} \approx 1,3 \text{ л}$
Задача 15	$m = \frac{\mu p_0 S L}{5RT} \approx 0,14 \text{ г}; \quad h = \frac{0,21L}{0,99} \approx 13 \text{ см}$
Задача 16	$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{2L\mu}{5RT} \left(1 - \frac{Mg}{pS} \right)$
Задача 17	$\varphi = 60 \%$
Задача 18	$V_0 = 20 \text{ л}; \quad m_1 = \frac{\mu_1 p_0 V_0}{RT} = 11,6 \text{ г}; \quad m_2 = \frac{\mu_2 p_0 V_0}{RT} = 18,7 \text{ г}$
Задача 19	$\Delta V = Sh \left(\sqrt{\frac{T_2}{T_1} \left(1 + \frac{p_0}{\rho gh} \right)} - 1 \right)$
Задача 20	$\Delta m = \frac{\mu V}{RT} (p_{\text{B}} - 2p) \approx 81 \text{ мг}$
Задача 21	$T_{\text{max}} = T_1 = 349 \text{ К}; \quad m = \frac{3\mu p_1 V_1}{2RT_1} \approx 19 \text{ г}$ $A = \frac{1}{2} p_1 V_1 (3 \ln 2 - 1) \approx 1,1 \text{ кДж}$