

Влажный воздух

Влажный воздух — это смесь сухого воздуха и водяного пара. При решении задач нужно помнить следующие факты.

- Давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара.
- Влажность воздуха — это отношение парциального давления водяного пара, присутствующего в воздухе, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре.
- Давление насыщенного водяного пара при 100°C приблизительно равно нормальному атмосферному давлению $p_0 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$.

ЗАДАЧА 1. («Физтех», 2018, 10) В цилиндре под поршнем находятся в равновесии воздух, водяной пар и вода. Отношение масс жидкости и пара $\alpha = 1/2$. В медленном изотермическом процессе объём влажного воздуха увеличивается в $k = 3$ раза.

- 1) Найти относительную влажность воздуха φ_1 в цилиндре в начале процесса.
- 2) Найти относительную влажность воздуха φ_2 в цилиндре в конечном состоянии.

$$\varphi_2 = 2\varphi \quad (2) \quad \varphi_1 = 1\varphi \quad (1)$$

ЗАДАЧА 2. («Физтех», 2018, 10) Два сосуда соединены короткой трубкой с закрытым краном. В одном сосуде объёмом $V_1 = 3,5$ л находится влажный воздух с относительной влажностью $\varphi_1 = 40\%$ при температуре T . В другом сосуде объёмом $V_2 = 2,5$ л находится влажный воздух с относительной влажностью $\varphi_2 = 60\%$ при той же температуре. Кран открывают, и влажный воздух в сосудах перемешивается. В сосудах устанавливается та же температура T . Найти относительную влажность φ воздуха в сосудах.

$$\varphi \approx \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} = 48\%$$

ЗАДАЧА 3. («Физтех», 2019, 10) В цилиндре с вертикальными гладкими стенками под покоящимся поршнем находятся вода и влажный воздух при температуре $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Площадь поршня $S = 100 \text{ см}^2$, масса M поршня такова, что $Mg = 0,5P_0S$, здесь $P_0 = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$ — давление в окружающей атмосфере. Высота поршня над поверхностью воды $H = 20 \text{ см}$. Температуру в цилиндре медленно уменьшили до $t_2 = 7^\circ\text{C}$. Давление водяного пара при $t_2 = 7^\circ\text{C}$ считайте пренебрежимо малым. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$. Молярная масса воды $\mu_1 = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$.

1. Найдите парциальное давление P_{CB} сухого воздуха в цилиндре под поршнем при $t_1 = 100^\circ\text{C}$.
2. На каком расстоянии h от поверхности воды остановится поршень при $t_2 = 7^\circ\text{C}$?

$$P_{CB} = 0,5P_0; \quad (2) \quad h \approx 5 \text{ см} \quad (1)$$

ЗАДАЧА 4. (МОШ, 2014, 11) Школьник Владислав проводит изотермический процесс над влажным воздухом в цилиндре, измеряя зависимость массы воды m_1 в жидком состоянии от объёма системы V . Владислав нанёс на график две измеренные им экспериментальные точки:

$$(V = 1 \text{ м}^3; m_1 = 30 \text{ г}) \text{ и } (V = 2 \text{ м}^3; m_1 = 20 \text{ г}).$$

Достройте данный график. Какова общая масса воды (в жидком и газообразном состояниях) в цилиндре? Какова плотность насыщенного водяного пара при данной температуре?

$$\rho_{\text{жидк}} = \rho_{\text{пар}} \cdot \frac{H}{H - h}$$

ЗАДАЧА 5. (Всеросс., 2015, МЭ, 11) В запаянной с одного конца горизонтально лежащей трубке находится воздух с относительной влажностью $\varphi_0 = 60\%$, отделённый от атмосферы столбиком ртути длиной $l = 74$ мм. Атмосферное давление соответствует $H = 740$ мм ртутного столба. Какой станет относительная влажность φ , если трубку поставить вертикально открытым концом вниз? Температура постоянна, ртуть из трубки при переворачивании не выливается.

$$\varphi = \frac{H - h}{H} \varphi_0 = \varphi_0 \cdot \frac{H - h}{H}$$

ЗАДАЧА 6. (МФТИ, 1991) В кастрюлю-скороварку залили небольшое количество воды при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, причём занимаемый водой объём намного меньше объёма кастрюли. После этого её герметично закрыли крышкой и медленно нагрели. Когда температура в кастрюле достигла $t_1 = 115^\circ\text{C}$, 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°C можно пренебречь. Плотность воды $\rho = 1 \text{ г/см}^3$.

$$\rho_{\text{жидк}} \cdot V_{\text{жидк}} \approx \left(\frac{\rho_{\text{жидк}}}{\rho_{\text{пар}}} - \frac{V_{\text{жидк}}}{V_{\text{пар}}} \right) \frac{m_{\text{жидк}}}{M} = \nu$$

ЗАДАЧА 7. (МФТИ, 1992) В горизонтально расположенном теплопроводящем цилиндре под подвижным поршнем заперт воздух при атмосферном давлении и комнатной температуре. В объём под поршнем впрыснули $m = 5$ г легко испаряющейся жидкости. После того, как жидкость испарилась, оказалось, что объём, занятый воздухом и парами жидкости, увеличился на $\Delta V = 0,6$ л. Найти по этим данным молярную массу жидкости. Наружное давление равно атмосферному, $t = 27^\circ\text{C}$. Объёмом, занимаемым жидкостью в начале опыта, можно пренебречь.

$$\rho_{\text{жидк}} \cdot \Delta V \approx \frac{\Delta V}{M} \rho_{\text{жидк}} = \nu$$

ЗАДАЧА 8. (МФТИ, 1992) Лёгкая подвижная перегородка делит герметичный теплопроводящий сосуд на две неравные части, в которых находится воздух при атмосферном давлении и комнатной температуре. В меньшую часть сосуда впрыскивается легко испаряющаяся жидкость, давление насыщенного пара которой при комнатной температуре равно $3,5$ атм. Спустя некоторое время перегородка перестала двигаться, а жидкость почти вся испарилась. Объём части сосуда, в которой находятся воздух и пары, увеличился при этом вдвое по сравнению с первоначальным. Найти, какую часть объёма сосуда составляла в начале его меньшая часть. Объёмом, занимаемым жидкостью в начале и конце опыта, можно пренебречь.

$$L/\varepsilon$$

ЗАДАЧА 9. В герметично закрытом сосуде объёмом $V = 1 \text{ дм}^3$ находится влажный воздух с относительной влажностью $\varphi = 70\%$ при температуре $t = 100^\circ\text{C}$. Давление в сосуде $p = 130 \text{ кПа}$. Найдите массу влажного воздуха. Молярная масса сухого воздуха $\mu_0 = 29 \text{ г/моль}$, молярная масса водяного пара $\mu = 18 \text{ г/моль}$, атмосферное давление $p_0 = 100 \text{ кПа}$.

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p - p_0}{R} \left(\frac{\mu_0}{M} + \varphi \frac{\mu}{M} \right) = \rho$$

ЗАДАЧА 10. В сосуде под поршнем находится воздух с относительной влажностью 40% . Какой станет относительная влажность, если объём воздуха изотермически уменьшить в три раза?

$$40\%$$

ЗАДАЧА 11. В вертикальном сосуде, закрытом невесомым поршнем площадью S , находится воздух с относительной влажностью 60% . На поршень осторожно положили груз массы m , в результате чего объём воздуха под поршнем изотермически уменьшился вдвое. Найдите давление насыщенного водяного пара при данной температуре. Атмосферное давление равно p_0 .

$$\left(\frac{S}{2} - p_0 \right) S = d$$

ЗАДАЧА 12. («Физтех», 2009) В цилиндре под поршнем находится воздух с относительной влажностью 70% . Объём цилиндра изотермически уменьшили в 10 раз. Какая часть водяного пара сконденсировалась? Объёмом жидкости в конечном состоянии можно пренебречь.

$$L/9$$

ЗАДАЧА 13. («Ломоносов», 2013) 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?

$$40\%$$

ЗАДАЧА 14. (МФТИ, 2003) Влажный воздух находится в цилиндре под поршнем при температуре 100°C и давлении $p_1 = 1,2 \text{ атмосферы}$. Если увеличить давление на поршень в $\beta = 2$ раза в изотермическом процессе, то объём, занимаемый воздухом, уменьшится в $\gamma = 2,5$ раза, а на стенках цилиндра выпадет роса. Найти начальную относительную влажность воздуха φ в цилиндре. Объёмом образовавшейся жидкости пренебречь.

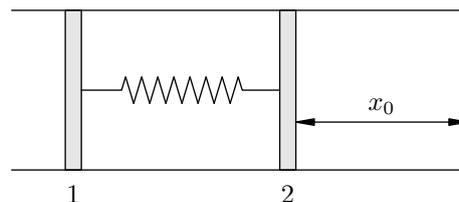
$$\rho_{\text{в}} = \frac{p - p_0}{R} \left(\frac{\mu_0}{M} + \varphi \frac{\mu}{M} \right) = \rho$$

ЗАДАЧА 15. (МФТИ, 2003) Влажный воздух с относительной влажностью $\varphi = 0,5$ находится в цилиндре под поршнем. Если в изотермическом процессе увеличить давление на поршень в $\beta = 3$ раза, то объём, занимаемый воздухом, уменьшится в $\gamma = 4$ раза, а на стенках цилиндра выпадет роса. Какую часть конечного давления в цилиндре составляет давление пара? Объёмом образовавшейся жидкости пренебречь.

$$\frac{p}{p_0} = \frac{(1 - \varphi)\beta}{\gamma - \varphi} = \rho$$

ЗАДАЧА 21. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11)

В гладкой горизонтальной трубе, закрытой с одного конца, находятся два вертикальных поршня (см. рисунок). Поршень 1 можно передвигать по трубе, фиксируя в разных положениях. Поршень 2 свободно скользит в трубе. Объём между поршнями вакуумирован, и между ними вставлена невесомая пружина. Между поршнем 2 и закрытым торцом трубы находится воздух с относительной влажностью $\varphi = 40\%$. Первоначально поршень 1 находится от торца трубы на расстоянии, равном длине недеформированной пружины, а поршень 2 — на расстоянии $x_0 = 5$ см. Температура системы поддерживается постоянной. Известно, что при заполнении объёма между поршнем 2 и торцом трубы только насыщенным водяным паром при этой же температуре поршень 2 (при том же положении поршня 1) располагался на расстоянии $x_0/2$ от торца. На какое расстояние надо сдвинуть поршень 1, чтобы расстояние между поршнем 2 и торцом трубы уменьшилось в $n = 4$ раза? Ответ приведите в см, округлив до десятых.

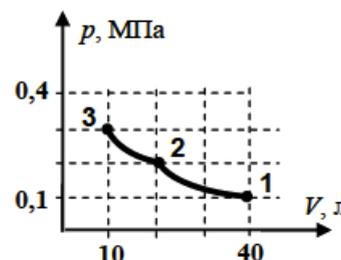


$$x_0 \approx \frac{u_0}{\rho - u_0 + (\rho - u_0) \frac{u_0}{\rho}} x = p$$

ЗАДАЧА 22. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) В закрытом сосуде объёмом $V = 25$ л находится сухой воздух при давлении $p_1 = 10^5$ Па и температуре $t_1 = -23^\circ\text{C}$. В сосуд помещают кусок льда массой $m = 9$ г и нагревают сосуд до температуры $t_2 = 127^\circ\text{C}$. Определите давление влажного воздуха p , если давление насыщенного пара при этой температуре $p_n = 250$ кПа. Молярная масса воды $\mu = 18$ г/моль. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К).

$$p \approx \frac{\lambda^{\text{пл}}}{\rho_{\text{л}} \mu} + \frac{p_n}{\rho} \rho = d$$

ЗАДАЧА 23. («Покори Воробьёвы горы!», 2014, 10–11) 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 $p_0 \approx 0,1$ МПа. Универсальная газовая постоянная $R = 8,31$ Дж/(моль · К). Считать молярные массы веществ известными: $\mu_1 = 18$ г/моль, $\mu_2 = 29$ г/моль.



$$\mu_1 \approx \frac{p_0 \mu_1}{p_0 - p_0} \mu_1 = \mu_1 \quad \mu_2 \approx \frac{p_0 \mu_2}{p_0 - p_0} \mu_2 = \mu_2$$

Задача 24. (МФТИ, 2003) Тонкая пробирка частично заполнена водой и расположена вертикально, открытым концом в атмосферу. Вследствие диффузии в пробирке устанавливается линейное изменение концентрации пара с высотой: вблизи поверхности воды пар оказывается насыщенным, а у верхнего открытого конца пробирки его концентрация составляет 60% от концентрации насыщенного пара. Пробирку сверху закрывают крышкой и охлаждают на $\Delta T = 2$ К. На сколько изменится по сравнению с первоначальным давление влажного воздуха внутри пробирки после установления равновесия? Атмосферное давление $p_0 = 755$ мм рт. ст., начальная температура $t_0 = 29^\circ\text{C}$, давление насыщенного пара при этой температуре $p_n = 30$ мм рт. ст. Известно, что малые относительные изменения давления насыщенного пара $\Delta p/p$ связаны с малыми относительными изменениями его температуры $\Delta T/T$ формулой $\Delta p/p = 18\Delta T/T$. Изменением объёма жидкости в пробирке во время опыта пренебречь.

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{\Delta T}{T} + \frac{p_n}{p_0} \frac{\Delta p_n}{p_n} \right) = p_0 \left(\frac{\Delta T}{T} + 0.6 \frac{\Delta T}{T} \right) = 1.6 p_0 \frac{\Delta T}{T}$$

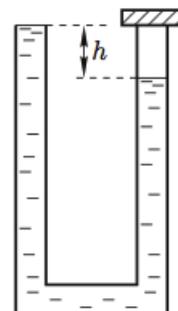
Задача 25. (МОШ, 2013, 10) Отопление на даче работает на природном газе — метане CH_4 , который сжигается в воздухе, соединяясь с кислородом O_2 . Из трубы дома в атмосферу выходят продукты сгорания: вода H_2O и углекислый газ CO_2 , а попутно с ними — не участвовавший в горении азот; кислорода нет совсем. Температура на выходе из трубы составляет 100°C . Найдите относительную влажность смеси газов, выходящих из трубы. Считайте, что в атмосферном воздухе на каждую молекулу кислорода приходится 4 молекулы азота, а наличием других газов можно пренебречь.

$$\% \text{RH} \approx \frac{11}{8} = 1.375$$

Задача 26. (МОШ, 2012, 10) Небольшой пустой тонкостенный цилиндрический стакан объёмом V_0 переворачивают вверх дном и медленно погружают в глубокий водоём, удерживая ось стакана в вертикальном положении. Над поверхностью водоёма находится воздух (атмосферное давление p_0), температура которого равна температуре воды, а относительная влажность составляет 100%. По какому закону будет изменяться модуль выталкивающей силы, действующей на стакан, при его погружении от поверхности воды в водоём на глубину H ? Плотность воды равна ρ , ускорение свободного падения g , давление насыщенных паров воды при данной температуре равно p_n .

$$F = \rho g V_0 \left(1 - \frac{p_n}{p_0} \right)$$

Задача 27. (Всеросс., 2007, ОЭ, 11) 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 (рис.). 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.



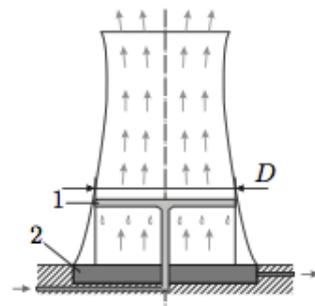
$$\left(1 - \left(\frac{p_n}{p_0} + 1 \right) \frac{V_0}{V} \right) \rho S h = \Delta V$$

ЗАДАЧА 28. (Всеросс., 2012, РЭ, 11) В цилиндре под поршнем находится влажный воздух. В изотермическом процессе объём цилиндра уменьшается в $\alpha = 4$ раза, при этом давление под поршнем увеличивается в $\gamma = 3$ раза.

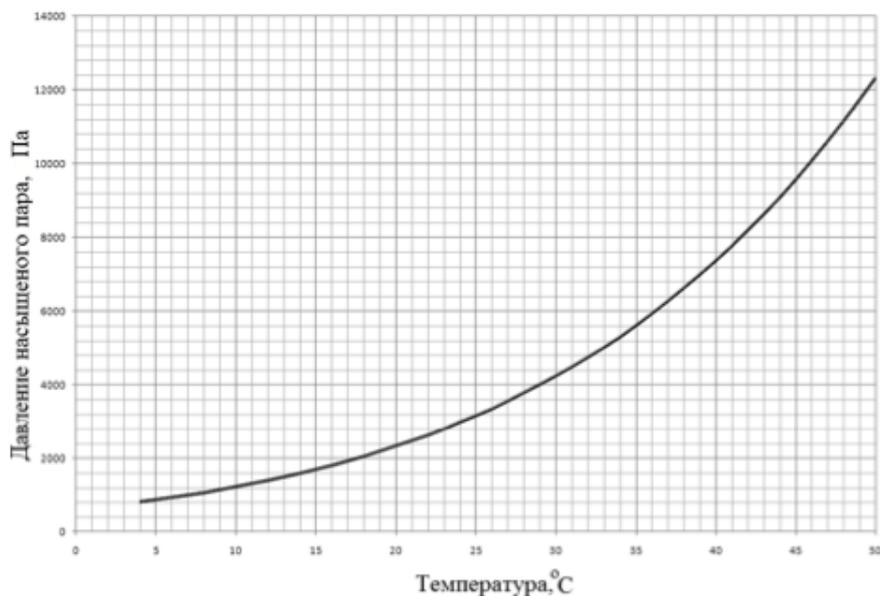
Какая часть первоначальной массы пара сконденсировалась? В начальном состоянии парциальное давление сухого воздуха в $\beta = 3/2$ раза больше парциального давления пара.

$$\frac{8}{9} = \frac{v}{(\beta+1)(\alpha-v)} = \frac{u}{w\alpha}$$

ЗАДАЧА 29. (Всеросс., 2014, РЭ, 11) На промышленных предприятиях для охлаждения больших объёмов воды используют градирни (рисунок справа). Рассмотрим идеализированную градирню, представляющую собой широкий цилиндр диаметром $D = 15$ м, в котором на некоторой высоте H от основания через специальные форсунки (1) распыляется горячая вода, температура которой $t_1 = 50^\circ\text{C}$. По мере падения она остывает до температуры $t_2 = 28^\circ\text{C}$. Посредством вентилятора навстречу падающим каплям снизу со скоростью $u = 2,0$ м/с поднимается воздух при температуре $t_0 = 29^\circ\text{C}$. Считайте, что его температура на протяжении всего пути остаётся неизменной, а влажность меняется от $\varphi = 40\%$ на входе до $\varphi_1 = 100\%$ на выходе из градирни. Какова производительность q градирни, то есть сколько тонн воды охлаждается в ней за один час?



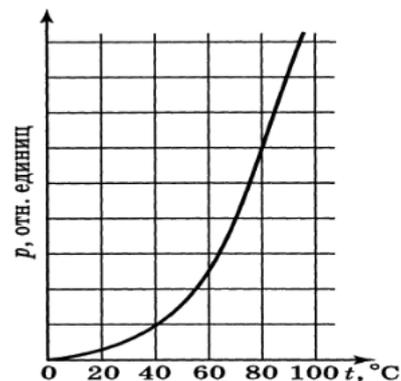
Справочные данные для воды: удельная теплоёмкость $c = 4200$ Дж/(кг · °С); удельная теплота парообразования $L = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг, температурная зависимость давления насыщенных паров приведена на графике (рисунок внизу).



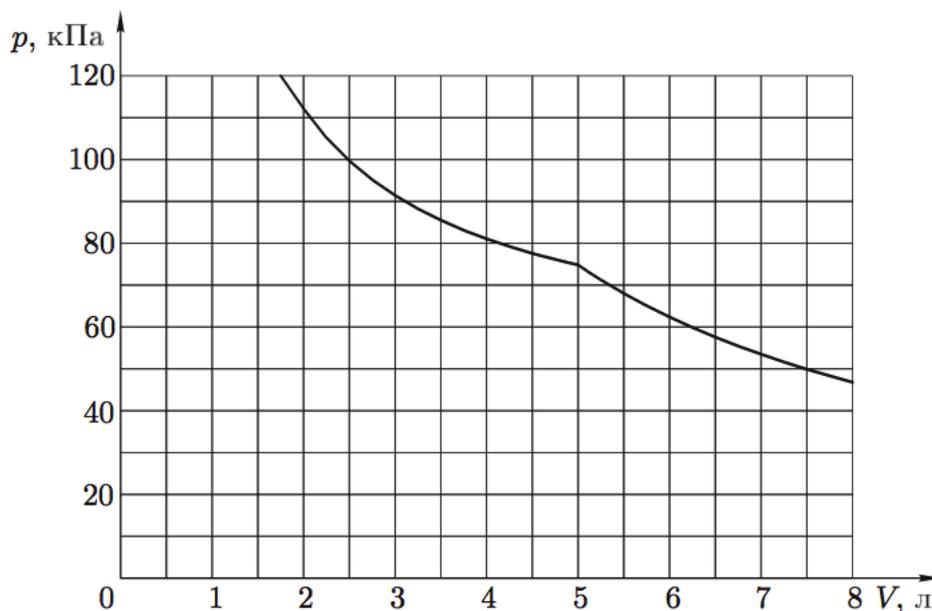
$$b = \frac{4RLc\Delta t}{L(\varphi-1)} \approx 150 \text{ кг/с} = 540 \text{ т/ч}$$

ЗАДАЧА 30. (Всеросс., 1999, финал, 10) В герметично закрытом сосуде находится влажный воздух, температура которого равна $t_1 = 75^\circ\text{C}$, а относительная влажность $\varphi_1 = 25\%$. Воздух в сосуде начинают охлаждать. При какой температуре t_2 внутренние стенки сосуда запотеют? График зависимости давления насыщенного водяного пара в относительных единицах от температуры приведен на рисунке.

$$0.07 = t_2$$



ЗАДАЧА 31. (Всеросс., 2008, финал, 10) В цилиндре под поршнем находится смесь воздуха и паров некоторой жидкости. Смесь изотермически сжимают. На рисунке представлена экспериментальная зависимость давления в сосуде от объёма в этом процессе.



Чему равны давление насыщенных паров жидкости p_n при данной температуре и внутренняя энергия смеси при объёме цилиндра более 5 л?

Примечание. Считать воздух идеальным двухатомным газом, а пары жидкости — идеальным трёхатомным газом.

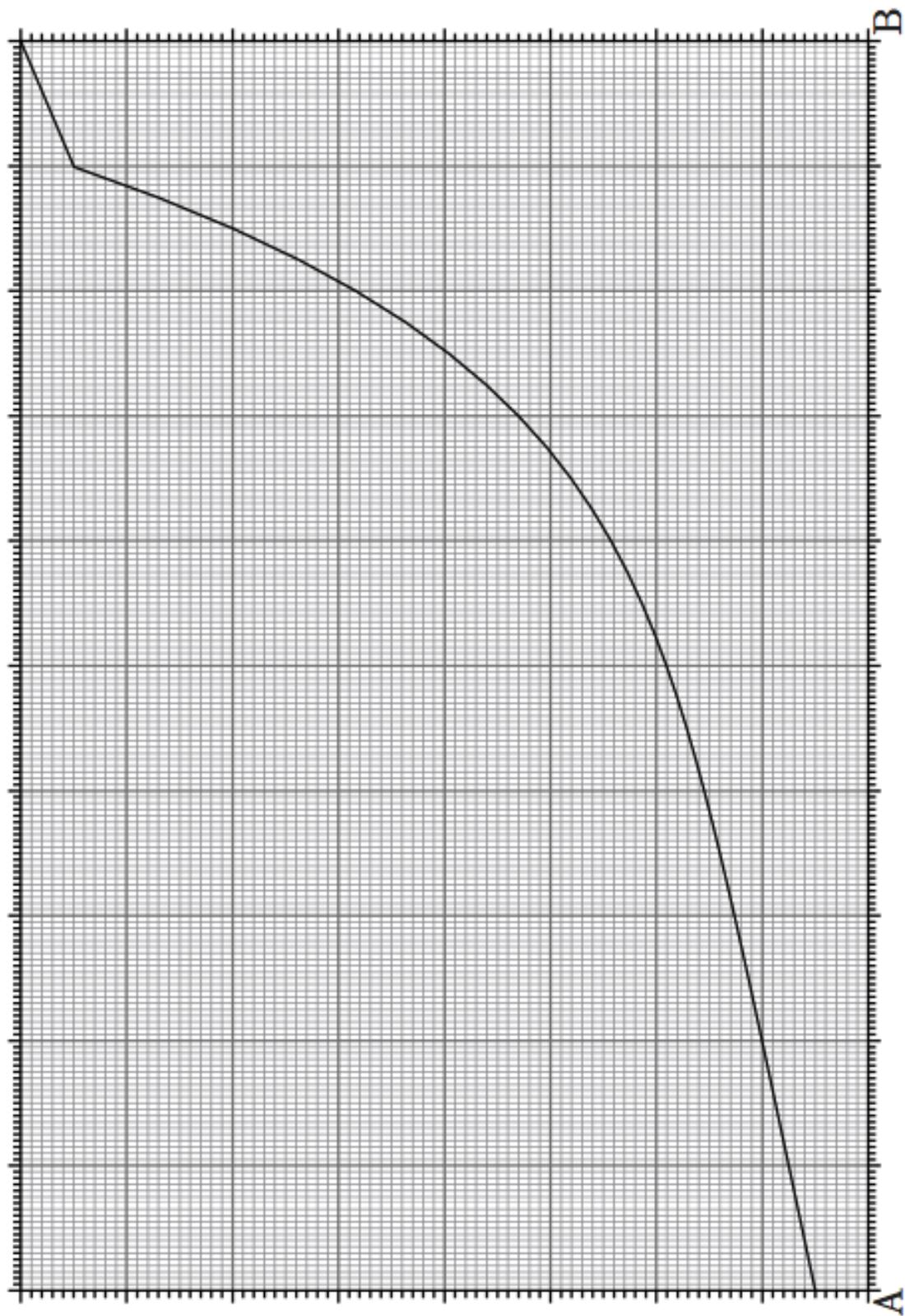
$$p_n \approx 50 \text{ кПа}, U \approx 1060 \text{ Дж}$$

ЗАДАЧА 32. (Всеросс., 2017, финал, 10) На рисунке (см. [отдельный лист](#)) представлен график зависимости давления от температуры при изохорном нагревании для смеси воздуха и воды. Известно, что на одно маленькое деление по оси ординат приходится 20 торр (одна атмосфера равна 760 торр). Определите:

- 1) Температуру и давление в точках *A* и *B*.
- 2) Температуру, при которой испарилось 40% воды. Не забудьте описать метод получения результатов.

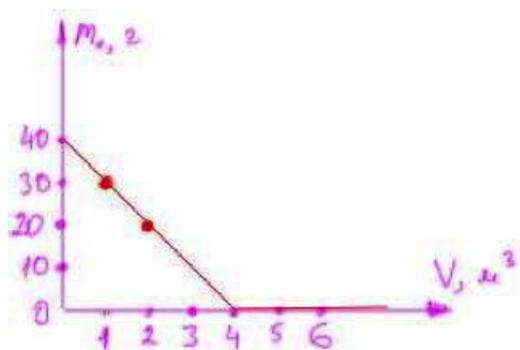
$$(1) p = 400 \text{ торр}, T_A = 200 \text{ К}, T_B = 400 \text{ К}; (2) 353 \pm 1 \text{ К}$$

Рисунок к задаче 32



Ответ к задаче 4

График изображён на рисунке:



Общая масса воды составляет 40 г, плотность насыщенного водяного пара 10 г/м^3 .