

## 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  $100^\circ\text{C}$  приблизительно равно нормальному атмосферному давлению  $p_0 = 1 \text{ атм} = 10^5 \text{ Па}$ .

**ЗАДАЧА 1.** (*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?

См. решение

**ЗАДАЧА 2.** (*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  $l = 74 \text{ мм}$ . Атмосферное давление соответствует  $H = 740 \text{ мм}$  ртутного столба. Какой станет относительная влажность  $\varphi$ , если трубку поставить вертикально открытым концом вниз? Температура постоянна, ртуть из трубки при переворачивании не выливается.

$$\varphi = \frac{H}{l+H} \varphi_0 = \varphi$$

**ЗАДАЧА 3.** (*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  $20^\circ\text{C}$  можно пренебречь. Плотность воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ .

$$\rho \cdot V_0 \cdot \varphi_0 \approx \left( \frac{\partial V}{\partial t} - \frac{V}{t} \right) \frac{dt}{t} = v$$

**ЗАДАЧА 4.** (*МФТИ, 1992*) В горизонтально расположенном теплопроводящем цилиндре под подвижным поршнем заперт воздух при атмосферном давлении и комнатной температуре. В объём под поршнем впрыснули  $m = 5 \text{ г}$  легко испаряющейся жидкости. После того, как жидкость испарилась, оказалось, что объём, занятый воздухом и парами жидкости, увеличился на  $\Delta V = 0,6 \text{ л}$ . Найти по этим данным молярную массу жидкости. Наружное давление равно атмосферному,  $t = 27^\circ\text{C}$ . Объёмом, занимаемым жидкостью в начале опыта, можно пренебречь.

$$\rho_{\text{жидк}} / \rho_{\text{возд}} \approx \frac{\Delta V}{V_0} = \mu$$

ЗАДАЧА 5. (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/ε

ЗАДАЧА 6. 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  $p_0 = 100 \text{ кПа}$ .

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p}{R} (\mu_0 \varphi + (\mu_0 - \mu)(1 - \varphi)) = m$$

ЗАДАЧА 7. В сосуде под поршнем находится воздух с относительной влажностью 40%. Какой станет относительная влажность, если объём воздуха изотермически уменьшить в три раза?

%001

ЗАДАЧА 8. 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  $p_0$ .

$$\left(\frac{S}{\mu_0} - \mu\right) \rho = d$$

ЗАДАЧА 9. («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 10. («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  $\varphi$  имел воздух до начала сжатия?

%09 = φ

ЗАДАЧА 11. (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.

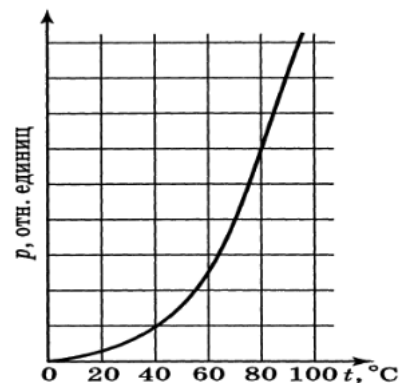
Какая часть первоначальной массы пара сконденсировалась? В начальном состоянии парциальное давление сухого воздуха в  $\beta = 3/2$  раза больше парциального давления пара.

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\nu}{(\beta + 1)(\alpha - \nu)} = \frac{m}{m_0}$$

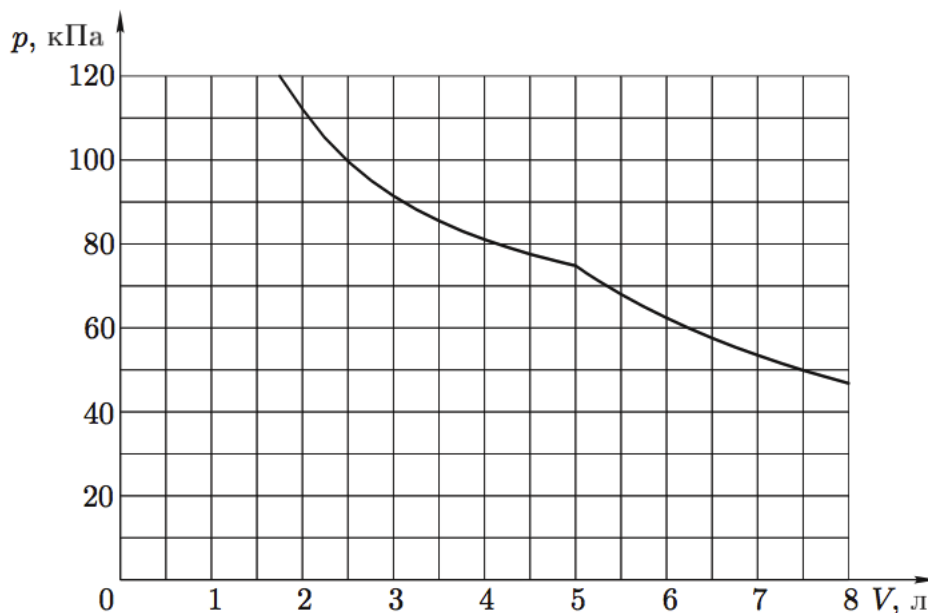


ЗАДАЧА 18. (Всеросс., 1999, финал, 10) В герметично закрытом сосуде находится влажный воздух, температура которого равна  $t_1 = 75^\circ\text{C}$ , а относительная влажность  $\varphi_1 = 25\%$ . Воздух в сосуде начинают охлаждать. При какой температуре  $t_2$  внутренние стенки сосуда запотеют? График зависимости давления насыщенного водяного пара в относительных единицах от температуры приведен на рисунке.

$$t_2 = 40^\circ\text{C}$$



ЗАДАЧА 19. (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 20. («Росатом», 2017, 11) В вертикальный цилиндрический сосуд с водой налили воду и закрыли сосуд очень лёгким подвижным поршнем. Первоначально воздух в сосуде сухой (не содержит паров воды) и имеет плотность  $\rho_0 = 1 \text{ кг/м}^3$ . Увеличится или уменьшится плотность влажного воздуха в сосуде, когда часть воды испарится? На сколько увеличится или уменьшится плотность влажного воздуха в сосуде по сравнению с плотностью сухого воздуха через достаточно продолжительное время, когда вода перестанет испаряться?

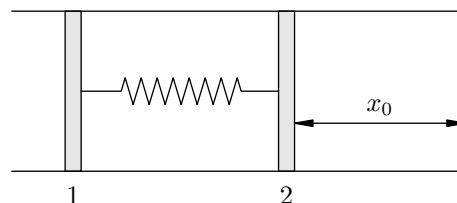


Температура воздуха постоянна в течение всего процесса. Давление насыщенных паров при рассматриваемой температуре составляет одну седьмую часть от атмосферного. Средняя молярная масса воздуха  $\mu_0 = 29 \text{ г/моль}$ , молярная масса воды  $\mu_1 = 18 \text{ г/моль}$ . Воздух считать идеальным газом.

$$\rho_{\text{увлажнённый}} = \left( \frac{\rho_0}{\tau} + \rho \right) \frac{\tau}{\sigma} = \rho$$

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  $x_0 = 5 \text{ см}$ . 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.

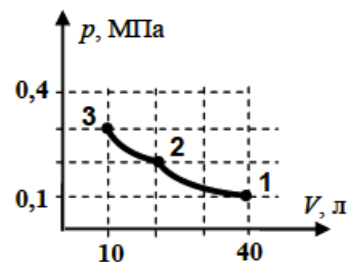


$$p_2 \approx \frac{u_2}{z - u + (\sigma - z)u} p_0 = p$$

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

$$p_{\text{увлажнённый}} \approx \frac{\Lambda^{\text{н}}}{\tau} + \frac{\tau}{L} p_d = p$$

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.



$$p_1 V_1 \approx \frac{L M_0}{\nu \Lambda^0 \Delta} \tau T = \tau u \quad ; \quad p_2 V_2 \approx \frac{L M_0}{\nu \Lambda^0 \Delta} \tau T = \tau u$$

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 крышечкой 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.

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \frac{p_n V_0}{1 - 0.4} = p_n V_0 \cdot 1.67$$

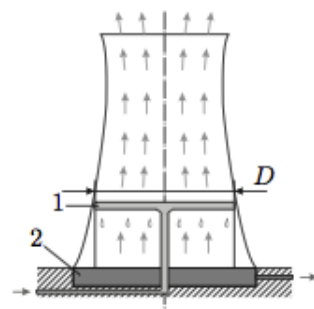
ЗАДАЧА 25. (МОШ, 2013, 10) Отопление на даче работает на природном газе — метане  $\text{CH}_4$ , который сжигается в воздухе, соединяясь с кислородом  $\text{O}_2$ . Из трубы дома в атмосферу выходят продукты сгорания: вода  $\text{H}_2\text{O}$  и углекислый газ  $\text{CO}_2$ , а попутно с ними — не участвовавший в горении азот; кислорода нет совсем. Температура на выходе из трубы составляет  $100^\circ\text{C}$ . 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.

$$\% \text{8I} \approx \frac{11}{2} = 5.5$$

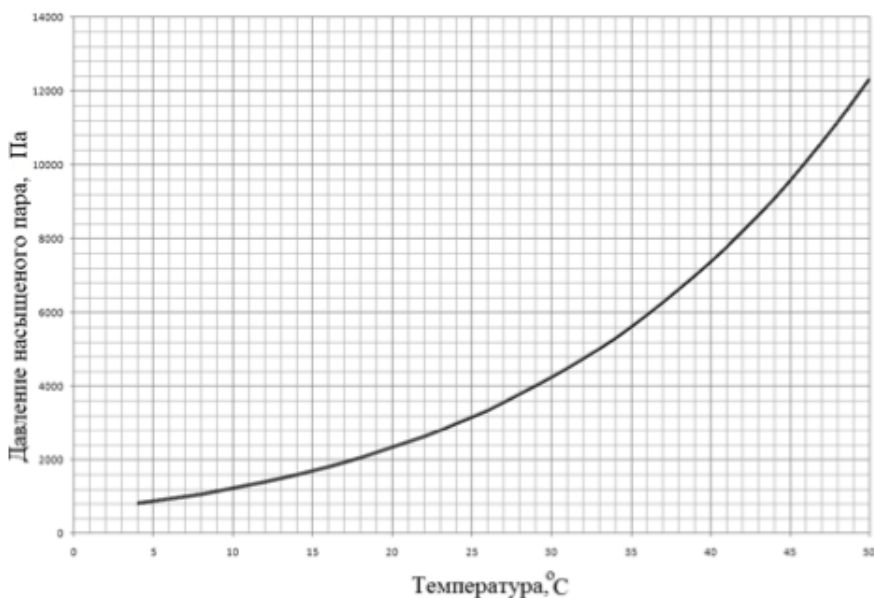
ЗАДАЧА 26. (МОШ, 2012, 10) Небольшой пустой тонкостенный цилиндрический стакан объёмом  $V_0$  переворачивают вверх дном и медленно погружают в глубокий водоём, удерживая ось стакана в вертикальном положении. Над поверхностью водоёма находится воздух (атмосферное давление  $p_0$ ), температура которого 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  $\rho$ , ускорение свободного падения  $g$ , давление насыщенных паров воды при данной температуре равно  $p_n$ .

$$F_b = \rho V_0 (g - \frac{p_n}{p_0})$$

ЗАДАЧА 27. (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).



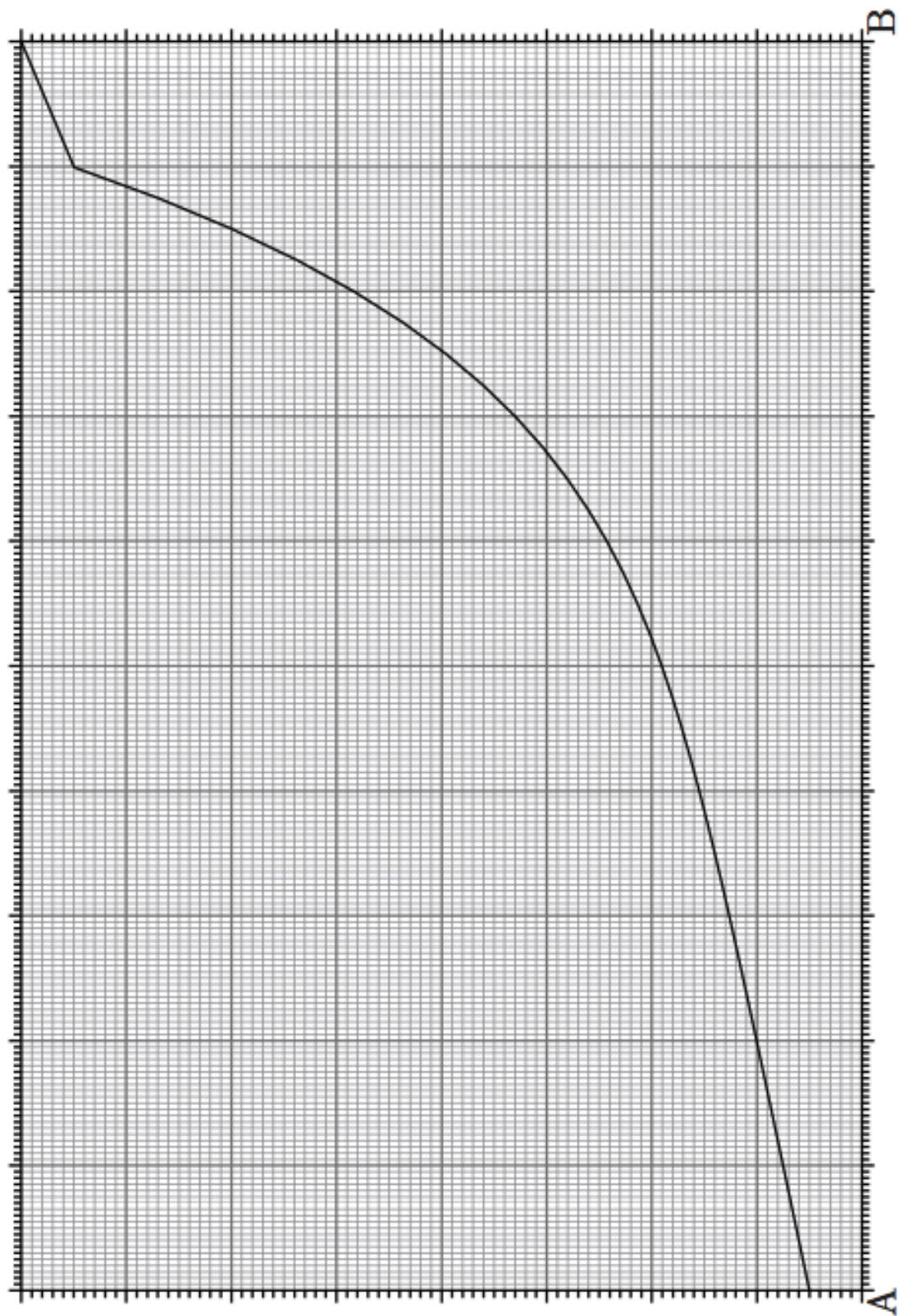
$$q = \frac{\pi D^2 u p_{\text{нас}}(1-\varphi)L}{4RLc\Delta t} \approx 150 \text{ т/ч} = 540 \text{ т/ч}$$

ЗАДАЧА 28. (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.

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

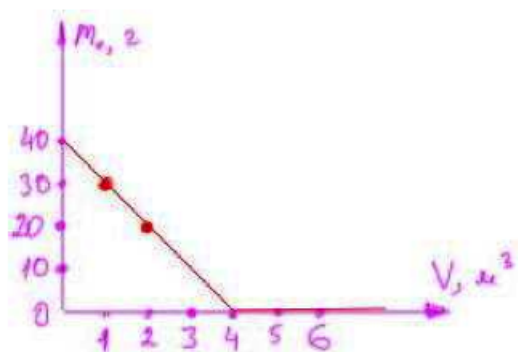
Рисунок к задаче 28





### Ответ к задаче 1

График изображён на рисунке:



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