

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

НР

НАУКА В РЕГИОНЫ

В. А. Яворский

Теплота

Методические материалы
по физике
для учащихся 8 класса



Иннопрактика

МФТИ
Долгопрудный, 2018

УДК ???
ББК ???
А23

Яворский В. А.

А23 Тепло́та: методические материалы по физике для учащихся 8 класса / В. А. Яворский. — Долгопрудный: МФТИ, 2018. — 30 с.

УДК ???
ББК ???

В настоящем пособии дается обзор приемов и методов, используемых при решении задач по физике, с примерами решения олимпиадных задач с муниципального и регионального этапов Всероссийской олимпиады школьников по физике.

Книга предназначена учащимся 8 класса школ с углубленным изучением физики и математики, учителям физики и математики, руководителям кружков и факультативов по физике, а также всем людям, увлекающимся физикой.

Яворский Владислав Антонович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики МФТИ

Содержание

Фазовые переходы	4
Теория	4
Задачи на тепловой баланс	7
Задачи на плотность	13
Задачи повышенной сложности	15
Задачи для самостоятельного решения	17
Насыщенные и ненасыщенные пары	18
Теория	18
Задачи на фазовые переходы	20
Задачи на влажность	27
Задачи для самостоятельного решения	27

Фазовые переходы

Теория

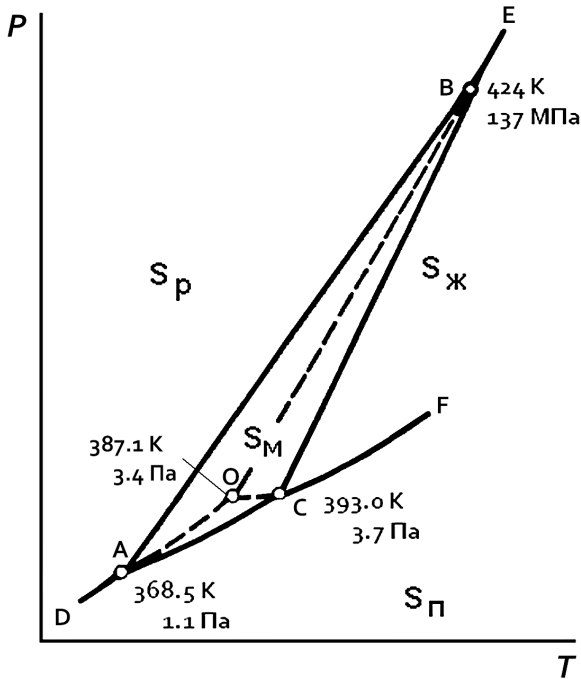
В повседневной жизни каждый человек сталкивается с агрегатными состояниями вещества — когда в зависимости от температуры и давления оно может пребывать в виде газа, жидкости или твердого тела.

В чём же разница между ними? В газе силы притяжения между частицами не могут удержать их друг возле друга, и они разлетаются во все стороны, занимая весь доступный объем сосуда. В твердых телах, напротив, силы взаимного притяжения очень велики, вследствие чего твердое тело сохраняет свою форму достаточно продолжительное время. В кристаллах наблюдается *дальний порядок*, когда упорядоченное расположение частиц повторяется в пределах тысяч ячеек (кристаллическая решетка). Наконец, в жидкостях потенциальная энергия взаимодействия сравнима с кинетической энергией движения молекул, что приводит к ближнему порядку — упорядоченному относительно расположению соседних частиц жидкости. Однако эти связи существуют очень короткое время (порядка наносекунд), вследствие чего жидкости сохраняют свой объем, но не имеют своей формы. Также к агрегатным состояниям относят плазму (когда молекулы газа теряют электроны и становятся ионами) и конденсат Бозе–Эйнштейна (бозоны при температурах, близких к абсолютному нулю).

Фаза — физически однородная область вещества, отделенная от других областей границей раздела. *Фазовая диаграмма* (например, в координатах температура–давление) показывает фазовое состояние для каждой точки. Агрегатное состояние и фаза не являются синонимами. Например, для элементарной серы возможно существование четырех фаз: твёрдой ромбической, твёрдой моноклинной, жидкой и газообразной, а на фазовой диаграмме серы имеются два поля твёрдых фаз: область ромбической серы и область существования моноклинной серы (треугольник $\triangle ABC$ на рисунке ниже).

При изменении внешних условий (например, температуры или давления) возможен фазовый переход (смена фазового состояния вещества).

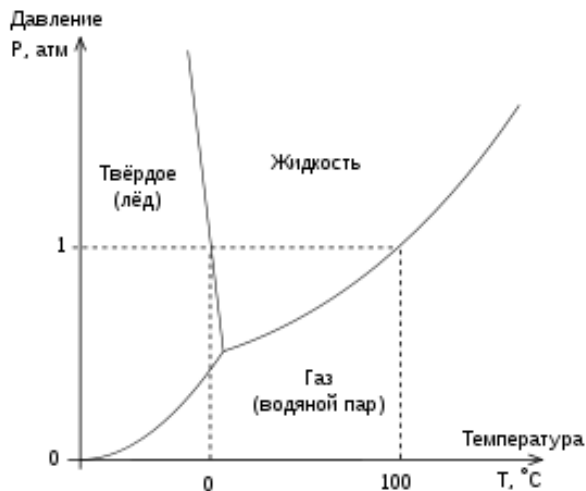
1. Испарение: жидкость \rightarrow газ.
2. Конденсация: газ \rightarrow жидкость.
3. Плавление: твёрдое тело \rightarrow жидкость.
4. Кристаллизация: жидкость \rightarrow твёрдое тело.
5. Сублимация (возгонка): твёрдое тело \rightarrow газ.
6. Десублимация: газ \rightarrow твёрдое тело.



Различают фазовые переходы I рода (скачкообразное изменение удельного объёма, плотности, внутренней энергии) и II рода (скачкообразное изменение теплоёмкости, коэффициента теплового расширения, симметрии кристаллической решетки и т. д.). Фазовые переходы I рода, к которым относятся изменения агрегатного состояния веществ, всегда сопровождаются выделением или поглощением энергии (теплота фазового перехода). Удельная (или молярная) теплота фазового

перехода зависит от температуры. В справочниках, как правило, приводится значение для $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ или $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Важным примером является фазовое равновесие между различными агрегатными состояниями воды (H_2O) — льдом, водой и паром (см. на рисунке фазовую диаграмму воды).



Поскольку вода является одним из самых распространенных веществ на Земле, в разные периоды времени на основе её свойств вводились различные эталонные величины, такие как градус Цельсия, градус Кельвина, калория.

Обращаем внимание, что любая точка на фазовой диаграмме находится в *термодинамическом равновесии* — состоянии системы, при котором остаются неизменными во времени макроскопические величины этой системы (температура, давление, объём) в условиях изолированности от окружающей среды. В неравновесном состоянии состояние системы может быть произвольным — например, если положить закрытую бутылку с дистиллированной водой в морозильник, то спустя 15–20 минут вода охладится до температуры меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, однако может остаться в метастабильном жидком состоянии. Если теперь сильно ударить чем-то по пробке, по воде пройдет волна кристаллизации. Данный эффект используют при создании многоцветных солевых гребков на основе выделения тепла при изменении фазового состояния

некоторых материалов (например, кристаллизации ацетата натрия).

При решении задач используется уравнение теплового (энергетического) баланса: при замерзании воды, конденсации пара и понижении температуры системы тепло выделяется ($Q > 0$), а при плавлении льда, испарении воды и повышении температуры системы тепло поглощается ($Q < 0$). Обращаем внимание, что изменение агрегатного состояния системы происходит при постоянной температуре (например, даже при работе нагревателя температура смеси воды и льда будет 0°C , пока весь лед не растает).

Также необходимо обратить внимание, что плотность льда, образующегося в природных условиях (так называемая модификация I_h), имеет плотность меньше плотности воды ($\rho_{\text{л}} = 916,7 \text{ кг/м}^3$ при 0°C). С этим связано явление увеличения объема воды при её замерзании (примерно на 9%), что может, например, привести к разрыву труб при аварии на теплотрассе.

Поскольку лед более лёгкий, то первоначальное образование льда происходит на поверхности воды, что препятствует дальнейшему ее замерзанию из-за образования теплоизолирующего слоя льда. Максимум плотности жидкой воды достигается при $t = 4^\circ\text{C}$, это предотвращает опускание на дно приповерхностных слоев воды, остывших до температуры ниже 4°C . Конвективное перемешивание жидкости блокируется, что сильно замедляет дальнейшее её охлаждение.

Задачи на тепловой баланс

Задача 1. Для охлаждения коктейля из морозилки достали несколько кубиков льда (общая масса $m = 30 \text{ г}$, температура $t_{\text{л}} = -18^\circ\text{C}$) и положили в $M = 270 \text{ г}$ напитка. Определите конечную температуру напитка, если исходно он имел комнатную температуру ($t_{\text{к}} = 25^\circ\text{C}$). Удельная теплоёмкость льда $C_{\text{л}} = 2050 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$, удельная теплоёмкость воды в коктейле $C_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$, теплота плавления льда $\lambda = 330 \text{ кДж/кг}$.

Решение. Пусть t_x — конечная температура напитка. Учитывая, что тепло от охлаждения коктейля тратится последовательно на нагрев

льда от температуры $t_{\text{л}}$ до 0°C , плавление льда и нагрев воды от 0°C до температуры t_x , запишем уравнение теплового баланса:

$$C_{\text{л}}m(0 - t_{\text{л}}) + \lambda m + C_{\text{в}}m(t_x - 0) = C_{\text{в}}M(t_{\text{к}} - t_x),$$

$$t_x(C_{\text{в}}M + C_{\text{в}}m) = C_{\text{в}}Mt_{\text{к}} + C_{\text{л}}mt_{\text{л}} - \lambda m,$$

$$t_x = \frac{C_{\text{в}}Mt_{\text{к}} + C_{\text{л}}mt_{\text{л}} - \lambda m}{C_{\text{в}}(m + M)} \approx 14^\circ\text{C}.$$

Ответ: 14°C .

Задача 2^[5]. В калориметр налито некоторое количество воды при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$. В него помещают лёд с начальной температурой $t = 0^\circ\text{C}$. Найти отношение максимальной массы растаявшего льда к исходной массе воды. Удельная теплоёмкость воды $C_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, теплота плавления льда $\lambda = 330 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Решение. Если льда будет слишком мало, он весь растает, и его количество не будет максимально возможным. Следовательно, льда надо брать с избытком. Поскольку, по условию задачи, его исходная температура $t = 0^\circ\text{C}$, то тепло на нагрев льда не тратится и масса растаявшего льда $m_{\text{л}}$ будет одна и та же.

Пусть $m_{\text{в}}$ — исходная масса воды. Тепло, выделяющееся при остывании льда, идёт на плавление льда. Запишем уравнение теплового баланса:

$$c_{\text{в}}m_{\text{в}}(t_0 - t) = \lambda m_{\text{л}}.$$

Отсюда находим отношение массы растаявшего льда к исходной массе воды:

$$\frac{m_{\text{л}}}{m_{\text{в}}} = \frac{c_{\text{в}}(t_0 - t)}{\lambda} \approx 0,25.$$

Ответ: 25% .

Задача 3^[11]. В калориметр поместили 100 г льда и налили 25 г воды. После установления теплового равновесия оказалось, что масса льда не изменилась. Какие значения начальной температуры могли быть у льда в таком эксперименте? Удельная теплоёмкость льда $C_{\text{л}} = 2050 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, удельная теплоёмкость воды в коктейле $C_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$, удельная теплота плавления льда $\lambda = 330 \text{ кДж}/\text{кг}$.

Теплоёмкостью калориметра и теплообменом с окружающей средой можно пренебречь.

Решение. Так как после теплообмена лёд находится в равновесии с жидкостью, то температура получившейся смеси 0°C . Масса льда не изменилась, что указывает на отсутствие процессов плавления и кристаллизации. По условию вода изначально была в жидком состоянии, следовательно, остыть она могла не более чем на 100°C .

Составим уравнение теплового баланса:

$$m_{\text{л}}c_{\text{л}}\Delta t_{\text{л}} = m_{\text{в}}c_{\text{в}}\Delta t_{\text{в}}.$$

Откуда, с учётом масс и теплоёмкостей, максимальное изменение температуры льда 50°C . Окончательно, лёд мог иметь температуру от 0°C до -50°C .

Ответ: от 0°C до -50°C .

Задача 4^[6]. В сосуде, из которого непрерывно откачивают находящийся в нём газ, находится некоторое количество воды при температуре 0°C . За счёт интенсивного испарения вода постепенно превращается в лёд. Какая доля β первоначальной массы воды может быть превращена в лёд таким способом? Тепловыми потерями пренебречь. Удельная теплота парообразования воды L и удельная теплота кристаллизации воды λ связаны соотношением

$$L/\lambda = \alpha = 6,7.$$

Решение. Пар образуется за счёт тепла, выделяющегося при замерзании воды. Пусть m_1 — масса замерзшей воды, тогда выделилась теплота $q = \lambda m_1$.

Этой энергии хватит на образование пара массой

$$m_2 = q/L = \lambda m_1/L,$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{L}{\lambda} = \alpha.$$

Так как вся вода превратилась либо в лёд, либо в пар, то первоначальная масса воды равна $m = m_1 + m_2$.

Отсюда получаем выражение для доли воды, перешедшей в лёд:

$$\beta = \frac{m_1}{m} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{m_1/m_2}{m_1/m_2 + 1} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} = 0,87.$$

Ответ: 0,87.

Задача 5. Оцените снижение температуры плавления льда под весом конькобежца массой $m = 60$ кг, если суммарная площадь лезвий коньков составляет $S = 6$ см², а температура плавления льда снижается на 1 °С при повышении давления на $p_0 = 133$ атм (1 атм $\approx 10^5$ Па). Ускорение свободного падения $g \approx 10$ м/с².

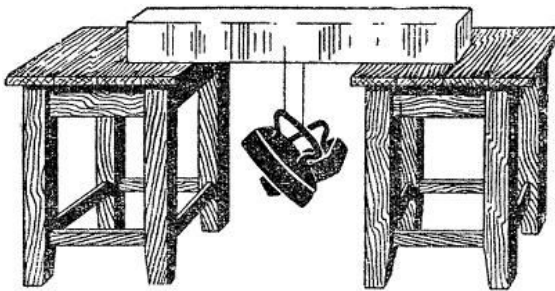
Решение. Конькобежец оказывает на лёд давление

$$p = mg/S = 60 \cdot 10 \text{ м/с}^2 / 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \approx 10^6 \text{ Па} = 10 \text{ атм}.$$

Если давление 133 атм приводит к снижению температуры плавления на 1 °С, то давление p — пропорционально меньше, т. е. примерно на 0 °С. Очевидно, что эта величина существенно меньше характерных температур зимой. Поэтому низкое трение скольжения коньков не является результатом понижения температуры под действием повышенного давления, а появляется вследствие выделения теплоты трения.

Ответ: ≈ 0 °С.

Задача 6^[2]. Можно ли перерезать лёд, оставив его целым?



Решение. Проведём следующий эксперимент: на два табурета положим ледяной брусок (диаметр или сторона порядка 5 – 10 см), а на него навесим медную проволоку диаметром 1 мм, к концам которой прикреплены два груза суммарной массой 10 кг.

Под весом грузов проволока будет постепенно опускаться, пока не пройдёт ледяной брусок насквозь. При этом, поскольку температура льда немного, но меньше температуры плавления (примерно $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), предыдущие участки смерзнутся и восстановят целостность, так что после всей процедуры брусок льда останется целым.

По формулам из предыдущей задачи можно посчитать, что уменьшение температуры плавления льда составит всего $0,037\text{ }^{\circ}\text{C}$, т. е. на процесс почти не влияет. Откуда же тогда берется энергия, чтобы нагреть еще на $0,46\text{ }^{\circ}\text{C}$? Из окружающей среды, тепло передается к месту контакта благодаря явлению теплопроводности. Свою лепту вносят и работа силы тяжести по опусканию груза, и наличие пузырьков газа во льду.

Задача 7^[2]. Из морозильника достали два кубика льда одинаковой массы. Один из них просто оставили в тарелке на открытом воздухе, а второй дополнительно завернули в шубу. Какой из кубиков растает раньше?

Решение (авторское). Что сказали бы вы, если бы вас стали уверять, будто шуба нисколько не греет? Вы подумали бы, конечно, что с вами шутят. А если бы вам стали доказывать это утверждение на ряде опытов? Прodelайте, например, такой опыт. Заметьте, сколько показывает термометр, и закутайте его в шубу. Через несколько часов выньте.

Вы убедитесь, что он не нагрелся даже и на четверть градуса: сколько показывал раньше, столько показывает и теперь. Вот и доказательство, что шуба не греет. Вы могли бы заподозрить, что шубы даже холодят. Возьмите два пузыря со льдом; один закутайте в шубу, другой оставьте в комнате незакрытым. Когда лед во втором пузыре растает, разверните шубу: вы увидите, что здесь он почти и не начинал таять. Значит, шуба не только не согрела лёд, но как будто даже охладила его, замедляя таяние!

Что можно возразить? Как опровергнуть эти доводы? Никак. Шубы действительно не греют, если под словом «греть» подразумевать сообщение теплоты. Лампа греет, печка греет, человеческое тело греет, потому что все эти предметы являются источниками теплоты. Но шуба в этом смысле слова нисколько не греет. Она своего тепла не даёт,

а только мешает теплоте нашего тела уходить от него.

Вот почему теплокровное животное, тело которого само является источником тепла, будет чувствовать себя в шубе теплее, чем без неё. Но термометр не порождает собственного тепла, и его температура не изменится от того, что мы закутаем его в шубу. Лёд, обернутый в шубу, дольше сохраняет свою низкую температуру, потому что шуба — весьма плохой проводник теплоты — замедляет доступ к нему тепла извне, от комнатного воздуха.

В таком же смысле, как шуба, снег греет землю; будучи, подобно всем порошкообразным телам, плохим проводником тепла, он мешает теплу уходить из покрытой им почвы. В почве, защищённой слоем снега, термометр показывает нередко градусов на десять больше, чем в почве, не покрытой снегом.

Итак, на вопрос, греет ли нас шуба, надо ответить, что шуба только помогает нам греть самих себя. Вернее было бы говорить, что мы греем шубу, а не она нас.

Ответ: тот, что находится на открытом воздухе.

Задача 8^[2]. Можно ли льдом поджечь спичку?

Решение. Можно. Правда, поджигать будет не сам лёд (он остаётся холодным), а солнечные лучи, которые можно сфокусировать на кончике спички большим куском льда в форме линзы.



Для приготовления такой линзы необходимо набрать чистую воду в таз или блюде со сферически выпуклым дном, и выставить его на мороз. После того как вода замерзнет, получившийся кусок надо очень аккуратно достать (во избежание сколов и трещин) и отполировать (для максимальной прозрачности). Отметим, что такой способ добычи огня был упомянут ещё в произведениях Жюль Верна.

Ответ: да.

Задачи на плотность

Задача 9^[2]. Для более быстрого охлаждения кастрюли с горячим супом куда лучше положить лёд — на крышку или под днище кастрюли?

Решение (авторское). Желая нагреть воду, мы помещаем сосуд с водой над пламенем, а не сбоку от него. И поступаем вполне правильно, так как воздух, нагреваемый пламенем, становится более легким, вытесняется со всех сторон кверху и обтекает наш сосуд.

Следовательно, помещая нагреваемое тело над пламенем, мы используем теплоту источника самым выгодным образом.

Но как поступить, если мы хотим, напротив, охладить какое-либо тело с помощью льда? Многие, по привычке, помещают тело над льдом, — ставят, например, кувшин молока поверх льда. Это нецелесообразно: ведь воздух над льдом, охладившись, опускается вниз и заменяется окружающим теплым воздухом. Отсюда практический вывод: если хотите остудить напиток или кушанье, помещайте его не на лёд, а под лёд.

Поясним подробнее. Если поставить сосуд с водой на лёд, то охладится лишь самый нижний слой жидкости, остальная же часть будет окружена неохлажденным воздухом. Напротив, если положить кусок льда поверх крышки сосуда, то охлаждение его содержимого пойдёт быстрее. Охлажденные верхние слои жидкости будут опускаться, заменяясь теплой жидкостью, поднимающейся снизу, пока не охладится вся жидкость в сосуде (чистая вода охлаждается при этом не до 0°C , а только до температуры 4°C , при которой она имеет наибольшую плотность. Но на практике и не встречается надобности охлаждать напитки до нуля). С другой стороны, охлажденный воздух вокруг льда также будет опускаться вниз и окружит собой сосуд.

Ответ: лёд нужно положить на крышку.

Задача 10^[20]. К дну кастрюли примёрз кусок льда, имеющий температуру 0°C . В кастрюлю налили воду при 0°C в таком количестве, что она полностью покрыла кусок льда. При этом высота уровня воды составила $h_0 = 20$ см. После того, как содержимому кастрюли передали $Q = 60$ кДж теплоты, $\eta = 10\%$ льда растаяло, а оставшийся лёд

поднялся на поверхность воды. На какой высоте h оказался при этом уровень воды в кастрюле? Кастрюля имеет цилиндрическую форму, площадь её поперечного сечения $S = 200 \text{ см}^2$.

Решение. Пусть m_0 — начальная масса льда. Тогда примёрзший ко дну лёд вытесняет объём $V_0 = m_0/\rho_{\text{л}}$. Всплывший лёд массой $m = m_0(1 - \eta)$ вытеснит объём $V = m/\rho_{\text{в}}$, а образовавшаяся при таянии льда массой ηm_0 вода займёт объём $V' = \eta m_0/\rho_{\text{в}}$. Обозначив через $V_{\text{в}}$ начальный объём воды в кастрюле, имеем:

$$Sh_0 = V_{\text{в}} + V_0, Sh = V_{\text{в}} + V + V'.$$

Из записанных равенств находим

$$h = h_0 - \frac{m_0}{S} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}\rho_{\text{л}}}.$$

Для определения начальной массы льда воспользуемся уравнением теплового баланса:

$$Q = \eta m_0 \lambda,$$

откуда $m_0 = \frac{Q}{\eta \lambda}$. Окончательно

$$h = h_0 - \frac{Q}{\eta \lambda S} \frac{\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}\rho_{\text{л}}} \approx 19 \text{ см}.$$

Ответ: 19 см.

Задача 11^[21]. Сосуд наполовину заполнен водой, в которой плавает кусок льда. Поверх льда наливают керосин, верхний уровень которого устанавливается на высоте h от дна сосуда. Как изменится эта высота, когда лёд растает?

Решение. Возможны два варианта системы: 1) лёд полностью скрыт под керосином; 2) лёд выступает над керосином.

В первом варианте учитываем, что объём воды меньше объёма растаявшего куска льда, следовательно, суммарный объём уменьшится, и уровень керосина относительно дна сосуда понизится.

Для разбора ситуации во втором случае применим метод «деформации жидкостей» — заменим слой керосина толщины H_1 таким слоем

воды толщины H_2 , что положение куска льда не изменится. Поскольку плотность воды больше плотности керосина, то $H_2 < H_1$. При плавлении льда в воде уровень воды не меняется (возможность доказать это утверждение предоставляем школьникам). Если теперь совершить обратную замену и вернуть керосин, то выяснится, что слой керосина над поверхностью, которую раньше образовывала вода, растекается по большей площади и уровень керосина понижается, по сравнению с исходным уровнем.

Ответ: понижается.

Задачи повышенной сложности

Задача 12^{[19]*}. Температура плавления массивного образца олова $t_0 = 232^\circ\text{C}$. Температура плавления мельчайших оловянных шариков диаметром $d = 20$ нм оказывается на 25°C ниже и равна $t_d = 207^\circ\text{C}$. Это так называемый размерный эффект, причём экспериментально установлено, что температура плавления зависит не только от размеров, но и от формы образца. При какой температуре будет плавиться оловянная фольга толщиной $h = d$?

Считайте, что атомы олова в приповерхностном слое толщиной в 2–3 межатомных расстояния обладают некоторой избыточной энергией по сравнению с энергией атомов в объёме, а теплота плавления λ в пересчёте на один атом пропорциональна средней энергии связи U атомов в веществе, которая, в свою очередь, пропорциональна абсолютной температуре T фазового перехода (плавления): $\lambda \sim U \sim T$.

Решение. Уменьшение температуры плавления для нанобъектов связано с увеличением (при уменьшении объёма) доли приповерхностных атомов, обладающих избыточной энергией U по сравнению с объёмными атомами. Для образцов различной формы эти доли оказываются разными.

Найдём долю атомов, которые находятся в поверхностном слое некоторой малой толщины δ :

$$\frac{\Delta N_\delta}{N} = \frac{\Delta V_\delta}{V} \approx \frac{4\pi R^2 \delta}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3\delta}{R} = \frac{6\delta}{d}.$$

Справедливость приближения $\delta = d$ можно проверить через оценку характерного линейного размера одного атома:

$$a = V^{1/3} = \left(\frac{\mu}{\rho N_a} \right)^{1/3} \approx 0.3 \text{ нм} \ll d = 20 \text{ нм}.$$

Теплота плавления уменьшается на величину избыточной энергии всех приповерхностных атомов:

$$\Delta q_0 = \Delta U \cdot \Delta N_\delta = \Delta U \cdot N \frac{6\delta}{d}.$$

Новая теплота плавления:

$$q = q_0 - \Delta q_0 = q_0 - \Delta U \cdot N \frac{6\delta}{d}.$$

В расчёте на один атом:

$$\lambda = \frac{q}{N} = \frac{q_0}{N} - \Delta U \frac{6\delta}{d}.$$

Учитывая, что $\lambda = q/N = \alpha T_d$ и $\lambda_0 = q_0/N = \alpha T_0$ (α — коэффициент пропорциональности), получаем относительное понижение температуры плавления наночастицы по сравнению с массивным образцом:

$$\frac{\Delta T_d}{T_0} = \frac{\Delta U}{\alpha T_0} \frac{6\delta}{d}.$$

Доля атомов в приповерхностном слое толщиной δ фольги площадью S :

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{2S\delta}{Sh} = \frac{2\delta}{h} = \frac{2\delta}{d}.$$

Соответственно, относительное понижение температуры плавления фольги:

$$\frac{\Delta T_h}{T_0} = \frac{\Delta U}{\alpha T_0} \frac{2\delta}{d} = \frac{1}{3} \frac{\Delta T_d}{T_0}.$$

Отсюда получаем:

$$\Delta T_h = \frac{1}{3} \Delta T_d \approx 8,30 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_h = t_0 - \Delta T_h = 223,7 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Ответ: 223,7 °C.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 13. Смогли бы солнечные лучи на экваторе растопить за один солнечный день снежный покров толщиной 1 м? Максимальная плотность потока солнечной энергии близка к 1 кВт/м^2 , а коэффициент отражения — 0,9.

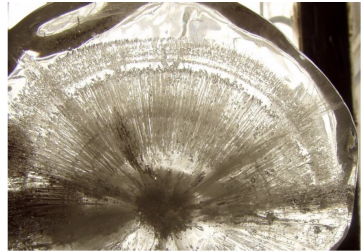
Задача 14. В цилиндрическом стакане при подводе к нему тепловой мощности 1 кВт тает лед. Диаметр стакана 10 см. Определите, как изменится давление смеси воды и льда на дно стакана из-за таяния льда.

Ответ: $\Delta p \approx 10^{-8} \text{ Па}$.

Задача 15. Лёд при температуре 0°C заключён в теплонепроницаемую оболочку и подвергнут давлению 100 МПа. Какая часть льда расплавилась, если при повышении давления на 13,8 МПа температура плавления льда понизилась на 1°C ? Удельная теплоёмкость льда $2,5 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Ответ: 6% льда.

Задача 16. Налейте в цилиндрическую форму (стакан или открытую банку из-под сгущенки) воды и поместите её в морозильник до полного замерзания. Достаньте получившийся лёд. Если разрезать цилиндр льда перпендикулярно оси,



вытянутые вдоль направления, в котором относительно стенок сосуда двигалась граница раздела вода — лёд. В некоторых случаях пузырьки сливаются, образуя сплошные трубочки из воздуха внутри льда. Объясните явление.

Насыщенные и ненасыщенные пары

Теория

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называется *насыщенным*. *Кипением* называется процесс интенсивного парообразования не только со свободной поверхности, но и по всему объёму жидкости внутри образующихся пузырьков пара. *Температурой (точкой) кипения* называется температура жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно или превышает внешнее давление:

$$p > p_0 + \rho g H + \frac{2\sigma}{R},$$

где p_0 — внешнее давление, $\rho g H$ — гидростатическое давление вышележащих слоев жидкости, $\frac{2\sigma}{R}$ — давление, связанное с кривизной поверхности пузырька, H — расстояние от центра пузырька до поверхности воды, ρ и σ — плотность и коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Давление насыщенных паров различных жидкостей зависит от температуры (но не от объёма!) и является табличной величиной.

Заметим, что теплота испарения жидкости с ростом температуры уменьшается, пока не достигает критической точки (для воды — $t = 374^\circ\text{C}$, $p = 218$ атм), в которой теплота испарения равна нулю, а граница раздела между жидкостью и газом исчезает. При сверхкритических температурах и при давлении порядка критического возможно только газообразное состояние вещества.

Пар называется *ненасыщенным*, если его давление меньше давления насыщенного пара при данной температуре (при этом жидкая фаза отсутствует, иначе система не может находиться в состоянии термодинамического равновесия).

Абсолютной влажностью воздуха называется масса водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха при данных условиях. Поскольку из уравнения Менделеева–Клапейрона следует, что при фиксированной

температуре плотность паров пропорциональна давлению

$$p = \frac{\rho RT}{\mu},$$

можно ввести безразмерную величину *относительной влажности* φ как отношение давления водяного пара, содержащегося в воздухе, к давлению насыщенного водяного пара при данной температуре: $\varphi = p/p_0$.

t, °C	P		t, °C	P		t, °C	P	
	кПа	мм рт.ст.		кПа	мм рт.ст.		кПа	мм рт.ст.
0	0,61129	4,585	34	5,3229	39,93	68	28,576	214,3
1	0,65716	4,929	35	5,6267	42,2	69	29,852	223,9
2	0,70605	5,296	36	5,9453	44,59	70	31,176	233,8
3	0,75813	5,686	37	6,2795	47,1	71	32,549	244,1
4	0,81359	6,102	38	6,6298	49,73	72	33,972	254,8
5	0,8726	6,545	39	6,9969	52,48	73	35,448	265,9
6	0,93537	7,016	40	7,3814	55,37	74	36,978	277,4
7	1,0021	7,516	41	7,784	58,38	75	38,563	289,2
8	1,073	8,048	42	8,2054	61,55	76	40,205	301,6
9	1,1482	8,612	43	8,6463	64,85	77	41,905	314,3
10	1,2281	9,212	44	9,1075	68,31	78	43,665	327,5
11	1,3129	9,848	45	9,5898	71,93	79	45,487	341,2
12	1,4027	10,52	46	10,094	75,71	80	47,373	355,3
13	1,4979	11,24	47	10,62	79,66	81	49,324	370
14	1,5988	11,99	48	11,171	83,79	82	51,342	385,1
15	1,7056	12,79	49	11,745	88,09	83	53,428	400,7
16	1,8185	13,64	50	12,344	92,59	84	55,585	416,9
17	1,938	14,54	51	12,97	97,28	85	57,815	433,6
18	2,0644	15,48	52	13,623	102,2	86	60,119	450,9
19	2,1978	16,48	53	14,303	107,3	87	62,499	468,8
20	2,3388	17,54	54	15,012	112,6	88	64,958	487,2
21	2,4877	18,66	55	15,752	118,1	89	67,496	506,3
22	2,6447	19,84	56	16,522	123,9	90	70,117	525,9
23	2,8104	21,08	57	17,324	129,9	91	72,823	546,2
24	2,985	22,39	58	18,159	136,2	92	75,614	567,2
25	3,169	23,77	59	19,028	142,7	93	78,494	588,8
26	3,3629	25,22	60	19,932	149,5	94	81,465	611
27	3,567	26,75	61	20,873	156,6	95	84,529	634
28	3,7818	28,37	62	21,851	163,9	96	87,688	657,7
29	4,0078	30,06	63	22,868	171,5	97	90,945	682,1
30	4,2455	31,84	64	23,925	179,5	98	94,301	707,3
31	4,4953	33,72	65	25,022	187,7	99	97,759	733,3
32	4,7578	35,69	66	26,163	196,2	100	101,32	760
33	5,0335	37,75	67	27,347	205,1			

Если в неравновесной системе при некотором внешнем воздействии (например, при сжатии объёма или понижении температуры) давление паров воды становится больше, чем давление насыщенного пара, то начинается конденсация. Температура, при которой водяные пары, ранее не насыщавшие воздух, становятся насыщающими, называется *точкой росы*.

Задачи на фазовые переходы

Задача 17. При беге трусцой (11 км/ч) по ровной местности расход энергии у человека составляет 485 ккал/ч, а при сидячей работе (решении задач по физике) — всего 75 ккал/ч. Предполагая, что при беге вся избыточная (по отношению к занятиям естественными науками) энергия выводится через потоотделение, оценить потери жидкости в организме бегуна за 1 час. Молярная теплота испарения воды — 44 кДж/моль.

Решение. По сравнению с расходом энергии при сидячей работе при беге дополнительно расходуется 410 ккал/ч, или 1722 кДж/ч. Молярная масса воды равна 18 г/моль, поэтому для испарения 1 кг воды потребуется энергия $2444 \text{ Дж/г} = 2444 \text{ кДж/кг}$. Следовательно, за час бега испарится 0,7 кг воды.

Ответ: 0,7 кг.

Задача 18^[1] В кастрюлю налили холодной воды (температура 10°C) и поставили на плиту. Через 10 минут вода закипела. Через какое время после этого момента она полностью испарится? Удельная теплоёмкость воды $4,2 \text{ Дж/г}$, теплота испарения при температуре кипения 2258 Дж/г .

Решение. Пусть P — мощность плиты, m — масса воды, $T_0 = 10^\circ\text{C}$ — начальная температура, $T_k = 100^\circ\text{C}$ — температура кипения воды, Δt_1 — время нагрева.

Запишем уравнение теплового баланса для процесса нагрева воды:

$$cm(T_k - T_0) = P\Delta t_1, \quad \frac{m}{P} = \frac{\Delta t_1}{c(T_k - T_0)}.$$

Предполагая, что далее мощность плиты осталась той же, запишем уравнение теплового баланса для процесса испарения воды:

$$Lm = P\Delta t_2,$$

где Δt_1 — время испарения воды. Отсюда:

$$\Delta t_2 = L \frac{m}{P} = L \frac{\Delta t_1}{c(T_k - T_0)} = \frac{2258 \text{ Дж/г} \cdot 10 \text{ мин}}{4,2 \frac{\text{Дж}}{\text{г} \cdot \text{°C}} \cdot 90 \text{ °C}} = 60 \text{ мин.}$$

Ответ: 60 мин.

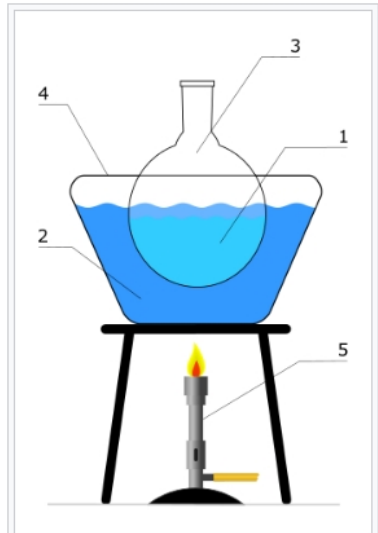
Задача 19^[2]. Будет ли кипеть вода в кастрюле, которая плавает в «большой» кастрюле с кипящей водой?

Решение. Увы! Вода в первой кастрюле нагреется до 100 °C , после этого теплообмен с водой в «большой» кастрюле прекратится, т. к. температуры станут равны. Для кипения необходима дополнительная энергия — теплота парообразования, а взять её неоткуда. При этом вода в «большой» кастрюле получает дополнительную энергию от дна кастрюли, имеющей более высокую температуру. Такое устройство для нагревания тела, когда достигается автоматическое ограничение максимальной температуры, называется водяной баней. При необходимости поддержания температуры ниже 100 °C можно в «большой» ёмкости взять другую жидкость или смесь жидкостей.

Если же в воду в «большой» кастрюле добавить поваренной соли, то её температура кипения повысится, и вода в первой кастрюле получит энергию, необходимую для перехода в пар.

Ответ: Не будет.

Задача 20^[2]. Можно ли вскипятить воду снегом?



Водяная баня (схема). 1 — нагреваемое вещество; 2 — вода; 3 — сосуд с веществом; 4 — ёмкость с водой; 5 — нагревательный элемент

Решение. Чтобы понять разницу с предыдущей задачей, давайте вспомним, что же такое кипение. *Температурой (точкой) кипения* называется температура жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно или превышает внешнее давление. Следовательно, если в результате какого-то процесса мы сможем понизить внешнее давление, чтобы оно стало меньше давления насыщенного пара, жидкость немедленно перейдет в состояние бурного кипения.

Возьмём закрывающийся стеклянный флакон, заполним его до половины водой и нагреем до $100\text{ }^\circ\text{C}$ на водяной бане с кипящей солёной водой. Когда вода во флаконе закипит, вынимаем флакон и быстро закупориваем его заранее приготовленной плотной пробкой или крышкой. Переворачиваем флакон и ждём, пока кипение прекратится.

Если теперь положить на доньшко немного снега или просто облить холодной водой, температура стенок флакона, а вслед и температура паров воды внутри флакона уменьшится. Это приведет к конденсации воды на стенках и резкому падению давления, что вызовет бурное кипение воды.

Внимание! Опыт необходимо проводить в стеклянной посуде с достаточно толстыми стенками, т. к. внешнее атмосферное давление, не встречая противодействия изнутри флакона, способно раздавить его, что может привести к напряжению деформации и разлёту осколков. Как альтернатива, можно взять пластиковую или жестяную бутылку, и наблюдать, как она деформируется под ударом внешнего давления.

Ответ: можно.

Задача 21^[7]. В теплоизолированном сосуде лежит кусок льда при температуре $t_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$. В сосуд небольшими порциями начинают впускать пар при $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$ до тех пор, пока в нём не окажется $m_0 = 100\text{ г}$ воды при $t = 100\text{ }^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты пар передаст содержимому сосуда?

Решение. Пусть M — начальная масса льда, m — масса впущенного пара, $\lambda = 330\text{ кДж/кг}$ — теплота плавления льда при $0\text{ }^\circ\text{C}$, $C = 4,2\text{ кДж/(кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ — удельная теплоёмкость воды, которую примем постоянной при всех температурах от $0\text{ }^\circ\text{C}$ до $100\text{ }^\circ\text{C}$, $L = 2258\text{ кДж/кг}$ — теплота парообразования при $100\text{ }^\circ\text{C}$.

Теплота, выделяющаяся при конденсации пара, идёт на плавление льда и последующий нагрев воды. Уравнение теплового баланса:

$$\lambda M + C(t - t_0) = Lm.$$

Помимо этого, необходимо записать уравнение материального баланса. Жидкость образуется как из плавления льда, так и из конденсации водяного пара:

$$m_0 = M + m,$$

отсюда $M = m_0 - m$. Подставляя выражение для M в уравнение теплового баланса и выражая m , получаем массу сконденсировавшегося пара:

$$m = m_0 \frac{\lambda + C(t - t_0)}{\lambda + C(t - t_0) + L} \approx 0,025 \text{ кг.}$$

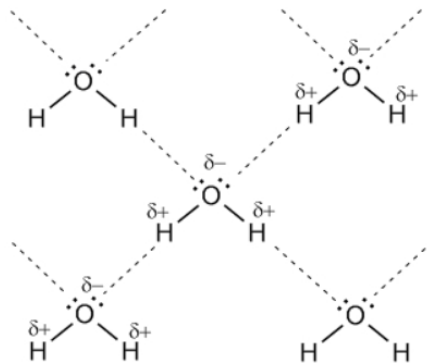
Далее находим количество переданной паром теплоты:

$$Q = Lm = 56,3 \text{ кДж.}$$

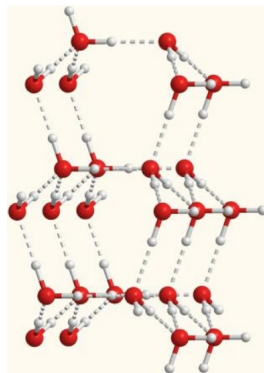
Ответ: 56,3 кДж.

Задача 22. Оцените суммарную энергию водородных связей, которые образуются между молекулами воды H_2O в 1 моле жидкости. Какую долю от теплоты испарения воды они составляют? Молярная масса воды равна $\mu = 18$ г/моль, средняя энергия водородной связи равна $E = 18$ кДж/моль, одна молекула воды в среднем образует $\alpha = 3,4$ водородных связи, плотность воды $\rho = 1000$ кг/м³.

Решение. Молекула воды состоит из атома кислорода O и двух атомов водорода H . Хотя в целом молекула электрически нейтральна, из-за перераспределения электронной плотности на кислороде появляется частичный отрицательный электрический заряд, а на водородах — частичные положительные электрические заряды. Как следствие, молекула воды начинает взаимодействовать с соседними молекулами воды, образуя короткоживущие химические связи, которые называются водородными (на рисунке ниже).



Водородные связи между молекулами воды (обозначены пунктиром).



Объёмная модель, показывающая расположение молекул воды, связанных водородными связями.

Потенциально каждая молекула могла бы образовать четыре водородных связи, однако вследствие их короткого периода «жизни» порядка 10^{-9} с (образовалась связь — разорвалась связь — образовалась связь — ...) в каждый момент времени в среднем существует 3,4 связи.

Чтобы найти их суммарную энергию, умножим количество молекул в 1 моле вещества (число Авогадро — $N_A = 6 \cdot 10^{23}$ частиц) на среднее количество связей для одной молекулы (и на 1/2, т. к. связь образуется между 2 учтёнными нами молекулами) и на энергию одной водородной связи E/N_A :

$$Q = \frac{N_A \alpha E}{2N_A} = \frac{\alpha E}{2} = 30,6 \text{ кДж/моль.}$$

При 20°C удельная теплота испарения воды составляет $L = 2454$ кДж/кг. Чтобы найти молярную теплоту испарения, умножим на молярную массу:

$$L_\mu = \mu L = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \cdot 2454 \text{ кДж/кг} = 44,2 \text{ кДж/моль.}$$

Видно, что доля энергии водородных связей в теплоте испарения составляет $Q/L = 69\%$! Остальные 30% приходятся на неполярные взаимодействия молекул между собой, а сама величина 13 кДж/моль является характерной для теплоты испарения неполярных жидкостей.

Ввиду большого количества водородных связей вода обладает аномально высокими значениями удельной теплоты парообразования и

удельной теплоемкости. Кроме того, молекулы воды на границе с газом или твердым телом не могут образовать достаточного количества водородных связей, что резко повышает их энергию по сравнению с молекулами внутри жидкости. Эту избыточную энергию в дальнейшем мы будем рассматривать как коэффициент поверхностного натяжения, определяющий гидрофобные и гидрофильные свойства других веществ.

Ответ: 30,6 кДж/моль; 69%.

Задача 23. Может ли человек опустить руку в жидкий азот ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$) без неприятных последствий?

Решение. Если на 1–2 секунды опустить руку в жидкий азот, то он начнет испаряться вокруг неё, и кожу от ожога будет защищать паровое одеяло – азот в газообразном состоянии. Но защищает очень недолго — всего 3–4 секунды достаточно, чтобы рука в жидком азоте получила термический ожог. Не пытайтесь сделать этот опыт без надлежащей подготовки!



Данное явление, когда жидкость при контакте с телом значительно более горячим, чем точка кипения этой жидкости, создает изолирующий слой пара, предохраняющий жидкость от быстрого выкипания, называется эффектом Лейденфроста, в честь Иоганна Готлаба Лейденфроста, упомянувшего этот эффект в своем трактате в 1756 году.

В повседневной жизни этот эффект проще всего наблюдать при приготовлении пищи на сковороде: если температура поверхности достигла или уже выше точки Лейденфроста (примерно $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ для капли воды размером 1 мм), вода соберётся в капли, которые будут «скользить» («левитировать») по поверхности металла и испаряться дольше, чем если бы это происходило в сковороде, нагретой сильнее точки кипения воды, но ниже точки Лейденфроста. Температура Лейденфроста зависит от размера капли, материала и рельефа поверхности, примесей в жидкости и т. д.

Если есть контакт обогревающей поверхности с кипящей жидкостью,

то при увеличении теплового потока до некоторой критической величины отдельные пузырьки пара сливаются, образуя у стенки сплошной паровой слой, в результате чего теплопередача от поверхности к жидкости резко падает (так называемое пленочное кипение). Данный эффект может вызывать проблемы в работе паровых котлов по причине существенного увеличения температуры греющей поверхности.

Ответ: может.

Задача 24. Что быстрее потушит пламя — кипяток или холодная вода?

Решение. Прежде, чем ответить на поставленный вопрос, желательно разобраться в принципах горения и собственно тушения огня. Сами по себе твёрдые тела не горят — сначала под воздействием высокой температуры происходит сублимация вещества (переход из твердого состояния в газообразное), затем газы вступают в химическую реакцию окисления. В качестве окислителя чаще всего выступает молекулярный кислород O_2 , объёмная доля которого в окружающем нас воздухе составляет около 21%. Таким образом, наиболее эффективным способом пожаротушения выступает не понижение температуры, а препятствие доступа к горящему телу новых порций окислителя.

Кипяток превращается в пар быстрее, чем холодная вода, а образующийся пар обволакивает тело, препятствуя поступлению кислорода. Следовательно, кипяток потушит пламя более эффективно.

Ответ: кипяток.

Задача 25. Одинаковы ли показания термометров, один из которых помещён у поверхности кипящей по всему объёму воды, а другой — в её толще?

Решение. Напомним, что температурой (точкой) кипения называется температура жидкости, при которой давление её насыщенного пара в пузырьках равно или превышает внешнее давление: $p_n \geq p_0 + \rho gh$.

Чем глубже в воде находится пузырёк, тем большим должно быть давление насыщенного пара в пузырьке, чтобы он не схлопывался. А этому соответствует и более высокая температура.

Ответ: термометр, погруженный в воду, покажет более высокую температуру.

Задача 26. Какого цвета водяной пар?

Решение. Водяной пар совершенно прозрачен, невидим и, следовательно, вовсе не имеет цвета. Белый туман, пар изо рта и облака — это не пар в физическом смысле слова, а скопление мельчайших водяных капелек.

Задачи на влажность

Задача 27^[3]. Температура воздуха в комнате $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, относительная влажность воздуха 60% . При какой температуре за окном начнут запотевать оконные стекла?

Решение. С явлением запотевания (например, стекла зеркала) мы постоянно сталкиваемся, когда вносим какой-то предмет с мороза в помещение, или принимаем горячий душ, с нагревом воздуха и испарением большого количества воды. Температура предмета (зеркала) получается ниже точки росы, и на его поверхности начинается конденсация.

Согласно приведённой выше таблице, при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление насыщенных паров $p_{\text{н.п.}} = 17,5$ мм рт. ст. Т. к. известна относительная влажность ϕ , найдём давление пара в комнате:

$$p = p_{\text{н.п.}} \cdot \phi = 17,5 \text{ мм рт. ст.} \cdot 0,6 = 10,5 \text{ мм рт. ст.}$$

Далее найдём в таблице температуру, при которой давление p будет соответствовать давлению насыщенного пара — этому соответствует $t_2 = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ответ: $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задачи для самостоятельного решения

Задача 28. На электрической плитке мощности 1 кВт кипит вода в чайнике. Найдите скорость истечения пара из носика чайника, если пар считать идеальным газом. Давление пара на конце носика 1 атм,

сечение носика 1 см^2 . Считать, что вся энергия плитки передаётся воде.

Ответ: $v = 8 \text{ м/с}$.

Задача 29. В комнате с закрытыми окнами при температуре 15°C относительная влажность $\varphi = 10\%$. Чему станет равна относительная влажность, если температура в комнате повысится на 10°C ? Давление насыщенного пара при 15°C — $p_{\text{н.п1}} = 12,8 \text{ мм рт. ст.}$, а при 25°C — $p_{\text{н.п2}} = 23,8 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $5,6\%$.

Задача 30. Оцените максимальную скорость испарения с поверхности 1 м^2 льда при 0°C и с поверхности воды при 100°C .

Ответ: $m_1 = 1,7 \text{ кг/с}$, $m_2 = 170 \text{ кг/с}$.

Задача 31. Как будет меняться температура кипения воды, если сосуд с водой опускать в глубокую шахту?

Список литературы

1. *И. И. Воробьев, П. И. Зубков, Г. А. Кутузова и др.* Задачи по физике: Учеб. пособие / Под ред. О. Я. Савченко. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 1999. — 370 с.
2. Перельман Я. И. «Занимательные задачи и опыты»
3. Яворский Б. М., Селезнев Ю. А., Физика. Справочное пособие. Для поступающих в вузы.
4. Билеты письменных вступительных экзаменов в МФТИ, 2000 г.
5. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2000–2001 гг.
6. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2001–2002 гг.
7. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2011–2012 гг.
8. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2012–2013 гг.
9. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2013–2014 гг.
10. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2014–2015 гг.
11. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2015–2016 гг.
12. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2016–2017 гг.
13. Муниципальный этап Всероссийской олимпиады школьников в г. Москва, 2017–2018 гг.
14. Региональный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2000–2001 гг.

15. Региональный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2009–2010 гг.
16. Региональный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2015–2016 гг.
17. Региональный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2016–2017 гг.
18. Региональный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2017–2018 гг.
19. Заключительный этап Всероссийской олимпиады школьников, 2014–2015 гг.
20. Олимпиада школьников «Ломоносов»
21. Журнал «Квант», 1971 г.