



## § 10.

### Испарение. Факторы, влияющие на скорость испарения

Задумывались ли вы над вопросом: почему сохнет мокрая одежда? Почему в ветреную погоду она высыхает значительно быстрее, чем в безветренную? Попробуем ответить на эти и некоторые другие вопросы.

Вспомним, что частицы вещества в любом его состоянии находятся в непрерывном движении. Значения и направления скорости меняются самым случайным образом. Молекула жидкости может получить большую скорость, соответственно большую кинетическую энергию. Такая молекула может преодолеть силы притяжения к другим молекулам и покинуть жидкость (рис. 59).

Так как молекулы с большой энергией в жидкости есть всегда, то со временем ее количество будет уменьшаться, а над жидкостью будет образовываться пар (газ).

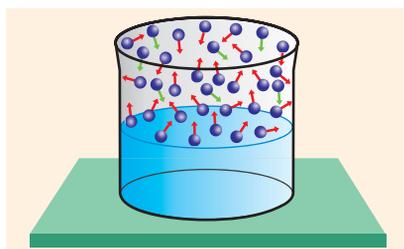


Рис. 59

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называется **парообразованием**. Различают два вида парообразования: *испарение* и *кипение*.

**Испарение** — это парообразование, идущее со свободной поверхности жидкости.

Под свободной поверхностью понимают поверхность жидкости, граничащую с газом или паром.

При испарении жидкость покидают молекулы с большей энергией. Энергия жидкости уменьшается. Значит, и ее температура уменьшается. Проверьте это на опыте. Капните на ладонь каплю воды. Вы ощутите холод. Это происходит потому, что при испарении вода забирает у ладони тепловую энергию. Ладонь охлаждается.

От чего зависит скорость испарения?

Проведем опыт. На стекло нанесем капли одинаковых размеров в такой последовательности: подсолнечное масло, вода, ацетон (рис. 60, а).

Первым исчезнет капля ацетона (рис. 60, б), затем воды. Масляная капля сохраняется долго. Отсюда следует вывод, что *скорость испарения у разных жидкостей неодинакова*. Это и понятно: у разных жидкостей силы взаимодействия молекул неодинаковые.

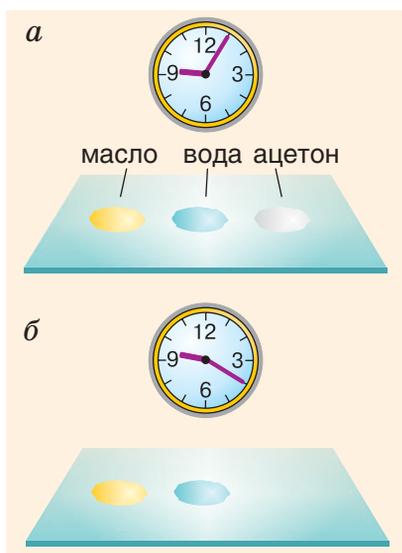


Рис. 60

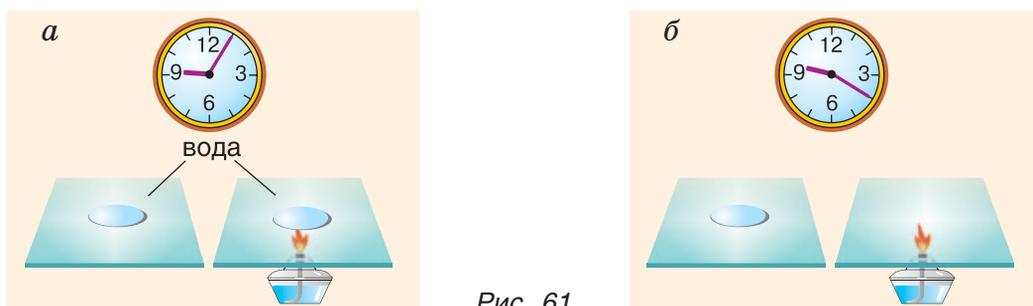


Рис. 61

Продолжим опыт. Одну стеклянную пластинку возьмем холодную, а другую нагреем. Нанесем на них две одинаковые капли ацетона или воды (рис. 61, а). С нагретого стекла капля исчезнет быстрее, чем с холодного (рис. 61, б). *Чем выше температура жидкости, тем больше скорость испарения.*

А теперь капнем на стекло две капли ацетона. Размажем одну каплю так, чтобы образовалось пятно (рис. 62, а). Пятно ацетона испарится быстрее (рис. 62, б). *Значит, чем больше площадь свободной поверхности жидкости, тем больше скорость испарения.*

Наконец, на два стекла нанесем по капле ацетона, но одно стекло будем обмахивать картонным веером. Капля с этого стекла испарится быстрее. Почему? При испарении молекулы не только покидают поверхность жидкости, но и возвращаются обратно. Ветер же уносит вылетевшие молекулы. На этом основана, например, сушка волос феном (рис. 63).

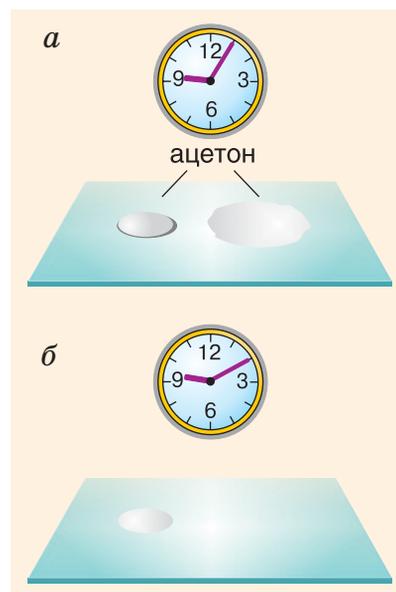


Рис. 62

### ▼ Для любознательных

Процесс испарения находит практическое применение в технике. Именно испарение лежит в основе работы наших домашних холодильников, холодильников магазинов и вагонов-рефрижераторов. О механизме охлаждения вы узнаете в 10-м классе.

В космонавтике испарение вещества, которым покрывают спускаемый аппарат, охлаждает его. Это спасает аппарат от перегрева при попадании в плотные слои атмосферы.



Рис. 63

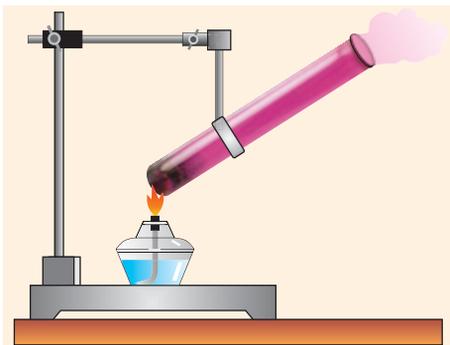


Рис. 64

А испаряются ли твердые вещества? Проведем следующий опыт. В пробирку, закрепленную на штативе, поместим кристаллики иода и будем нагревать ее в пламени спиртовки (рис. 64).

Через некоторое время кристаллики иода испарятся. Значит, твердые тела тоже испаряются. Исчезает иней на деревьях (рис. 65).

Белье высыхает даже при сильном морозе.



Рис. 65

### ■ Главные выводы

1. Испарение вызывает охлаждение жидкостей.
2. Испарение жидкостей происходит при любой температуре.
3. Скорость испарения зависит от рода жидкости, ее температуры, площади свободной поверхности и от притока воздуха (ветра).

### ? Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют испарением?
2. Почему при испарении жидкость охлаждается?
3. Какая составляющая внутренней энергии жидкости (кинетическая или потенциальная) изменяется при испарении жидкости без подачи теплоты извне? Почему?
4. Почему скорость испарения разных жидкостей неодинакова?
5. Помещение, в котором пролили ртуть, опасно для проживания. Почему? Воспользуйтесь Интернетом и ознакомьтесь с рекомендациями Министерства по чрезвычайным ситуациям, что делать, если разбился ртутный термометр.

## Упражнение 8

1. В каком флаконе — с узким или широким горлышком (рис. 66) — духи сохранятся дольше? Почему?

2. Почему при одной и той же температуре в безветренную погоду белье сохнет медленнее, чем при сильном ветре?

3. Чтобы в жаркую погоду сохранить воду холодной, сосуд с водой оборачивают мокрой тканью. Почему?

4. Будет ли вода испаряться из открытого сосуда, если его перенести из теплой комнаты ( $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ ) на улицу ( $t_2 = 2\text{ }^\circ\text{C}$ )? Обоснуйте ответ.

5. На весах уравновешены открытые бутылки с ацетоном и водой (рис. 67). Нарушится ли равновесие весов через некоторое время? Почему?

6. Почему, выйдя из воды, купальщик ощущает холод?

7. Почему вспотевшему человеку не рекомендуется выходить на холодный воздух?

8. Какое значение для жизнедеятельности человека имеет потоотделение?

9. Когда человек в очках заходит с холода в теплое помещение, очки моментально запотевают. Запотеют ли очки, если человек выйдет из теплого помещения на холод? Почему?

10. Почему в жаркую погоду или после быстрого бега собака часто дышит, высунув язык?

11. Объясните действие «воздушного полотенца» (струя теплого воздуха), применяемого для сушки мокрых рук (рис. 68).

 12. Если в сосуд налить немного воды, а сверху — эфира, а затем насосом откачать из него пары эфира, то вода в сосуде замерзнет. Объясните это явление.



Рис. 66



Рис. 67



Рис. 68



## § 11.

### Кипение жидкостей. Удельная теплота парообразования

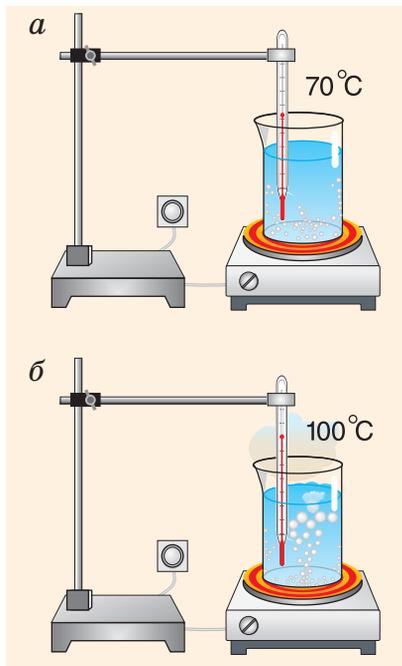


Рис. 69



Рис. 70



Рис. 71

Вы уже знаете, что испарение жидкости без притока тепловой энергии при любой температуре приводит к ее охлаждению. А как будет идти испарение, если жидкости непрерывно передавать теплоту?

Проведем опыт. Поставим на электроплитку стакан с водой (рис. 69, *a*). По термометру будем следить за изменением температуры воды в стакане. Температура воды сначала растет. На дне стакана появляется множество маленьких пузырьков. Их размеры постепенно увеличиваются, так как вода испаряется внутрь пузырьков и давление пара в пузырьках при нагревании повышается. Пузырьки отрываются ото дна и стенок и движутся вверх. А что дальше? Если давление пара внутри пузырька больше, чем над жидкостью, то у поверхности он разрывается, и пар выходит наружу. При этом температура воды равна  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  и практически не меняется. А все большее число пузырьков поднимается и лопается у поверхности, выбрасывая пар в атмосферу. Вода кипит (рис. 69, *б*).

**Кипение** — это процесс парообразования, идущий при постоянной температуре по всему объему жидкости. Действительно, любой пузырек можно рассматривать как сосуд с паром внутри жидкости (рис. 70). С поверхности его стенок идет испарение и обратный процесс — возврат молекул в жидкость, т. е. *конденсация*.

При кипении температура жидкости не меняется. Но ведь теплота (от нагретой плитки) жидкостью поглощается. На что же она расходуется? Теплота, полученная жидкостью, идет на превращение ее в пар (газ), т. е. на работу по преодолению сил притяжения между молекулами жидкости.

При обратном процессе — **переходе пара в жидкость** (рис. 71), или *конденсации*, это же количество теплоты выделяется.

**Температура, при которой происходит кипение жидкости, называется температурой кипения.**

Температура кипения у разных жидкостей неодинакова. Это и понятно, ведь энергия взаимодействия их молекул тоже разная.

В таблице 4 приведены температуры кипения жидкостей при нормальном атмосферном давлении.

А случайно ли мы, говоря о температуре кипения жидкости, указываем давление? Нет, не случайно. Пузырьки кипящей жидкости лопаются при условии, что давление пара в них не меньше, чем давление снаружи. Значит, *чем меньше внешнее давление, тем при более низкой температуре закипит жидкость.*

Подтвердим это опытом. Нальем в колбу теплой воды, температура которой  $t = 60\text{--}70\text{ }^\circ\text{C}$ . Закроем колбу пробкой, подсоединенной к откачивающему насосу (рис. 72). Будем откачивать газ из колбы. Вода закипит, хотя ее температура меньше  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Но это не значит, что в такой воде можно сварить яйцо. Яйцо варится не потому, что вода кипит, а потому, что она горячая.

А если в специальных условиях создать высокое давление над поверхностью воды, то в ней можно будет расплавить олово, но вода так и не будет кипеть. Объясните почему.

Зависимость температуры кипения от внешнего давления используется в практических целях. Например, для стерилизации медицинских инструментов их помещают в герметически закрытые камеры-автоклавы (рис. 73), вода в которых кипит при температуре значительно выше  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . В быту используются кастрюли-скороварки (рис. 74), в которых температура кипения воды может повышаться до  $120\text{ }^\circ\text{C}$ . Поэтому пища в скороварках готовится гораздо быстрее, чем в обычных кастрюлях.

Вернемся к парообразованию. Чтобы превратить в пар  $1\text{ кг}$  жидкости при температуре кипения, необходимо передать ей определенное

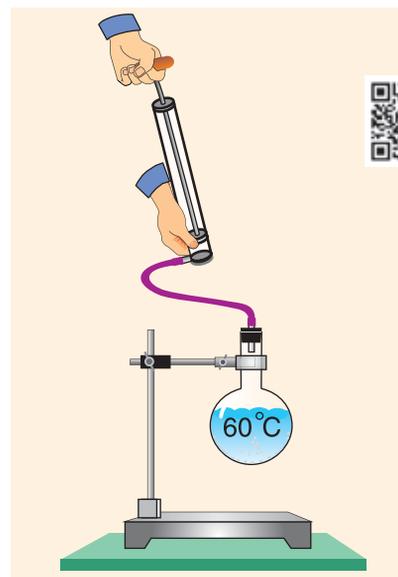


Рис. 72



Рис. 73



Рис. 74

количество теплоты. А если масса жидкости будет 2 кг? Значит, теплоты понадобится в 2 раза больше. А при превращении в пар  $m$  кг жидкости количество теплоты увеличится в  $m$  раз. **Количество теплоты, необходимое для парообразования, прямо пропорционально массе жидкости:**

$$Q = Lm.$$

В этой формуле коэффициент  $L$  называется **удельной теплотой парообразования**:

$$L = \frac{Q}{m}.$$

Как следует из формулы, основной единицей удельной теплоты парообразования в СИ является **1 джоуль на килограмм**  $\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$ .

**Удельная теплота парообразования есть физическая величина, численно равная количеству теплоты, поглощенному 1 кг жидкости при переходе ее в пар при температуре кипения.**

Таблица 4. Температура кипения и удельная теплота парообразования некоторых жидкостей (при нормальном атмосферном давлении)

| Вещество | Температура кипения $t$ , °C | Удельная теплота парообразования $L$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ |
|----------|------------------------------|--|
| Воздух   | -192                         | 210 000 = $2,1 \cdot 10^5$   |
| Аммиак   | -33,4                        | 1 370 000 = $1,37 \cdot 10^6$  |
| Эфир     | 35                           | 352 000 = $3,52 \cdot 10^5$  |
| Ацетон   | 56,2                         | 520 000 = $5,2 \cdot 10^5$   |
| Спирт    | 78                           | 857 000 = $8,57 \cdot 10^5$  |
| Вода     | 100                          | 2 260 000 = $2,26 \cdot 10^6$  |
| Ртуть    | 357                          | 285 000 = $2,85 \cdot 10^5$  |
| Железо   | 3050                         | 58 000 = $5,8 \cdot 10^4$  |

Удельная теплота парообразования различных жидкостей дана в таблице 4. Что значит  $L = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  для воды? А это значит, что

1 кг воды при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  должен поглотить  $2,26 \cdot 10^6$  Дж теплоты, чтобы перейти в газ (пар) с этой же температурой.

Можно сказать иначе:  $L = 2,26 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$  показывает, какое количество теплоты выделится при конденсации 1 кг пара при температуре кипения ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

### ■ Главные выводы

1. Превращение жидкости в газ (пар) при постоянной температуре во всем объеме жидкости называют кипением.
2. Температура кипения зависит от рода жидкости и внешнего давления.
3. Чем выше давление над поверхностью жидкости, тем выше температура кипения.
4. При кипении жидкость поглощает теплоту, при конденсации пара выделяется равное количество теплоты.
5. Количество поглощенной при кипении тепловой энергии зависит от рода жидкости и ее массы.

### ? Контрольные вопросы

1. Что представляет собой процесс кипения жидкости?
2. Почему температура жидкости в процессе кипения не изменяется?
3. Какой физический смысл имеет удельная теплота парообразования?
4. Исходя из формулы  $L = \frac{Q}{m}$ , поясните, будет ли верным утверждение: «Удельная теплота парообразования прямо пропорциональна количеству поглощенной теплоты и обратно пропорциональна массе жидкости».
5. Почему с увеличением внешнего давления температура кипения жидкости повышается, а с уменьшением — понижается?



### Пример решения задачи

На рисунке 75 представлен график зависимости количества теплоты, идущего на парообразование некоторой жидкости, от ее массы. Какую массу олова можно расплавить, используя теплоту конденсации пара данной жидкости массой  $m_1 = 0,01$  кг, взятого при температуре кипения? Температура олова  $t = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

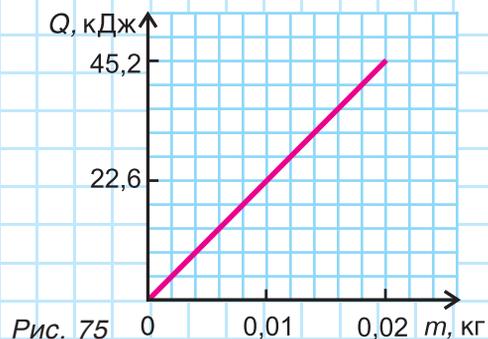


Рис. 75

Дано:

$$m_1 = 0,01 \text{ кг}$$

$$t = 32 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$t_{\text{пл}} = 232 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{ол}} = 250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}}$$

$$\lambda = 6,03 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$m$  — ?

Решение

Из графика найдем модуль количества теплоты, которое выделится при конденсации пара массой  $m_1 = 0,01$  кг:

$$|Q_{\text{кон}}| = Q_{\text{пар}} = 22,6 \text{ кДж} = 22\,600 \text{ Дж.}$$

Для нагревания до температуры плавления  $t_{\text{пл}}$  и плавления массы  $m$  олова необходимо количество теплоты

$$Q = c_{\text{ол}} m (t_{\text{пл}} - t) + \lambda m.$$

$$|Q_{\text{кон}}| = Q.$$

$$\text{Откуда } m = \frac{Q}{c_{\text{ол}}(t_{\text{пл}} - t) + \lambda}.$$

$$t_{\text{пл}} - t = 232 \text{ }^\circ\text{C} - 32 \text{ }^\circ\text{C} = 200 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\text{Тогда } m = \frac{22\,600 \text{ Дж}}{250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{ }^\circ\text{C}} \cdot 200 \text{ }^\circ\text{C} + 6,03 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,2 \text{ кг.}$$

Ответ:  $m = 0,2$  кг.

### Упражнение 9

1. Как можно разделить смесь жидкостей на отдельные компоненты?

2. Где кусок рыбы сварился бы на одной и той же горелке быстрее — у подножия горы Эверест или на ее вершине? Почему?

3. Какой участок графика (рис. 76) соответствует процессу кипения воды? Какова начальная температура воды? Конечная?

4. Опишите процессы, протекающие в веществе, анализируя участки I—V графика (рис. 77). Что это за вещество?

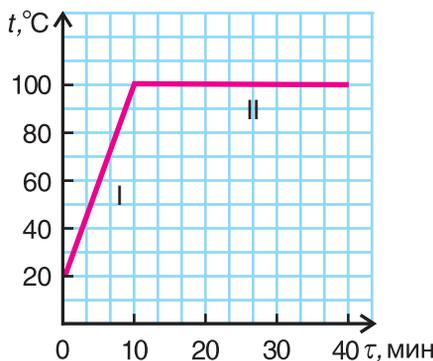


Рис. 76

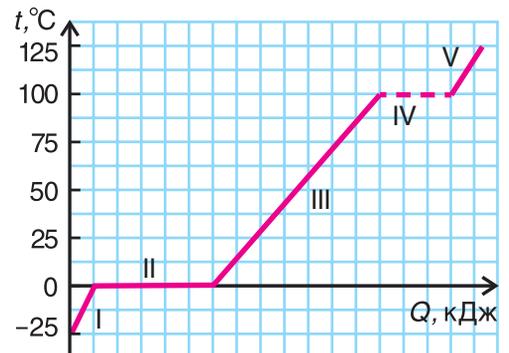


Рис. 77

5. Почему ожоги кожи водяным стоградусным паром более сильные, чем ожоги кипящей водой?

6. Что обладает большей внутренней энергией: эфир массой  $m = 100$  г при температуре  $t = 35$  °С или пары эфира той же массы при той же температуре?

7. При конденсации пара некоторой жидкости массой  $m = 200$  г при температуре кипения выделилось  $Q = 7,04 \cdot 10^4$  Дж теплоты. Чему равна удельная теплота парообразования этой жидкости? Какая жидкость образовалась при конденсации?

8. Сколько энергии необходимо для превращения в пар воды массой  $m = 2,0$  кг, взятой при температуре: а)  $t_1 = 100$  °С; б)  $t_2 = 20$  °С?

9. Используя график зависимости количества теплоты, необходимого для превращения жидкости в пар (газ), от массы жидкости (рис. 78), определите удельную теплоту парообразования. Какая это жидкость? Сколько теплоты выделится при конденсации пара данной жидкости массой  $m = 3,0$  кг?

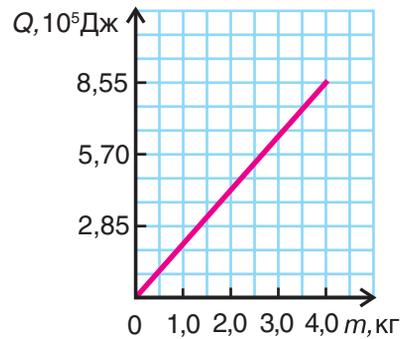


Рис. 78

10. Сколько льда, взятого при температуре  $t_1 = -10$  °С, можно полностью расплавить, если передать ему теплоту, выделившуюся при конденсации водяного пара массой  $m = 25$  г при температуре  $t_2 = 100$  °С?

11. В калориметре находится  $m_1 = 272$  г льда при температуре  $t_1 = 0,0$  °С. Какую минимальную массу водяного пара нужно впустить в калориметр, чтобы расплавить весь лед? Температура пара  $t = 100$  °С. Теплоемкостью калориметра и потерями энергии пренебречь.

12. В кастрюле с водой плавает пробирка, наполненная водой. При нагревании вода в кастрюле закипает. Закипит ли вода в пробирке?

13. Колбу, содержащую воду массой  $m_1 = 300$  г при температуре  $t = 40$  °С, нагревают на спиртовке. Какая масса воды превратится в пар, если в спиртовке сгорел спирт массой  $m_2 = 20$  г? Коэффициент полезного действия спиртовки  $\eta = 20$  %.

14. Смесь, состоящую из воды массой  $m_1 = 7,5$  кг и льда массой  $m_2 = 2,5$  кг, находящуюся при температуре  $t_1 = 0,0$  °С, необходимо нагреть до температуры  $t_2 = 50$  °С путем пропускания водяного пара, температура которого  $t_3 = 100$  °С. Определите массу пара. Потерями энергии пренебречь.