

## Не забудьте посолить

### Условие

#### Задача 3. «Не забудьте посолить»

Однажды юный физик Федя заметил, что кипение воды прекращается при добавлении соли. За разъяснениями он обратился к учителю физики. Опытный учитель привел сразу три объяснения:

- Во-первых, Федя, соль имеет комнатную температуру. Во-вторых, растворение соли происходит с поглощением тепла, в третьих, повышается температура кипения воды.
- А какой же решающий фактор? — спросил Федя.
- Это и будет твоим домашним заданием, — сказал учитель и вручил Феде справочник «Таблицы физических величин».

#### Часть 1. Фактор первый

«С первой причиной я разберусь и без справочника,» - подумал Федя. «Пусть  $m_B$  — масса воды,  $m_C$  — масса соли,  $c_B$  — удельная теплоемкость воды,  $c_C$  — удельная теплоемкость соли. Температуру кипения воды обозначим  $t_K$ , температуру соли —  $t_C$ ».

**1.1** Получите выражение для изменения температуры воды при добавлении соли, считая что она не растворяется.

Теплоемкость воды Федя знал наизусть  $c_B = 4200 \text{ Дж/кг} \cdot ^\circ\text{C}$ , а теплоемкость соли начал искать в справочнике, но не нашел. Зато увидел таблицу зависимости удельной теплоемкости солевого раствора от его концентрации.

**Таблица 1. Зависимость удельной теплоемкости солевого раствора от концентрации**

| $\eta, \%$                                       | 0    | 5    | 10   | 15   | 20   | 25   |
|--------------------------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $c, \text{кДж} / \text{кг} \cdot ^\circ\text{C}$ | 4,20 | 4,00 | 3,90 | 3,68 | 3,55 | 3,36 |

\*Подсказка. Концентрация соли в растворе определяется следующим образом:  $\eta = \frac{m_C}{m_P}$ , где  $m_C$  — масса соли,  $m_P$  — масса раствора.\*

Кроме того, Федя узнал о «правиле смешения», согласно которому теплоемкость смеси равна сумме теплоемкостей отдельных составляющих.

**1.2** Используя данные таблицы, убедитесь, что «правило смешения» вполне применимо для раствора поваренной соли в широком диапазоне концентраций, а также определите удельную теплоемкость соли  $c_C$ .

**1.3** Масса воды  $m_B = 1,0 \text{ кг}$ , температура воды  $t_K = 100^\circ\text{C}$ , температура соли  $t_C = 20^\circ\text{C}$ . Вычислите изменение температуры (по формуле, полученной Вами в пункте 1.1) для  $m_{C1} = 20 \text{ г}$  и  $m_{C2} = 300 \text{ г}$ .

#### Часть 2. Фактор второй

Чтобы рассчитать, на сколько охлаждается вода при растворении, Федя начал искать в справочнике удельную теплоту растворения  $q$  поваренной соли. Удивительно, но оказалось, что эта теплота зависит от того, как много соли растворяется в воде (см. таблицу 2).

**Таблица 2. Удельная теплота растворения поваренной соли в воде:**

| $m_c, \text{г}$ - масса соли на 1 кг воды | 10   | 50   | 100  | 200  | 350  |
|-------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| $q, \text{кДж/кг}$                        | 72,3 | 66,2 | 57,3 | 42,5 | 32,2 |

**2.1** В воду  $m_B = 1 \text{ кг}$  бросают соль при той же температуре  $t_K$  (для исключения первого фактора). Определите изменение температуры раствора в результате растворения соли для  $m_{C1} = 20 \text{ г}$  и  $m_{C2} = 300 \text{ г}$ .

#### Часть 3. Фактор третий

Следующая необходимая для расчета таблица называлась «Температуры кипения раствора соли»

**Таблица 3. Температуры кипения раствора соли**

|                 |     |       |       |       |       |       |
|-----------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\eta, \%$      | 0   | 5     | 10    | 15    | 20    | 25    |
| $t_k, ^\circ C$ | 100 | 100,5 | 101,0 | 101,6 | 102,2 | 102,9 |

**3.1** Используя табличные данные, покажите, что увеличение температуры кипения раствора пропорционально отношению масс соли и воды, т. е.  $\Delta t = \alpha \frac{m_c}{m_b}$ . Определите коэффициент пропорциональности  $\alpha$ .

**3.2** Определите, на сколько градусов увеличивается температура кипения при добавлении в воду ( $m_b = 1,0 \text{ кг}$ )  $m_{c1} = 20 \text{ г}$  и  $m_{c2} = 300 \text{ г}$  соли.

**Часть 4. Когда же снова закипит?**

**4.1** Один килограмм чистой воды нагрелся от комнатной температуры  $t_c = 20^\circ C$  до температуры кипения  $t_k = 100^\circ C$  за 5 мин. Оцените, через сколько секунд возобновится кипение при добавлении  $m_{c1} = 20 \text{ г}$  и  $m_{c2} = 300 \text{ г}$  соли? Считайте, что растворение соли происходит достаточно быстро.



**Рис. 1**

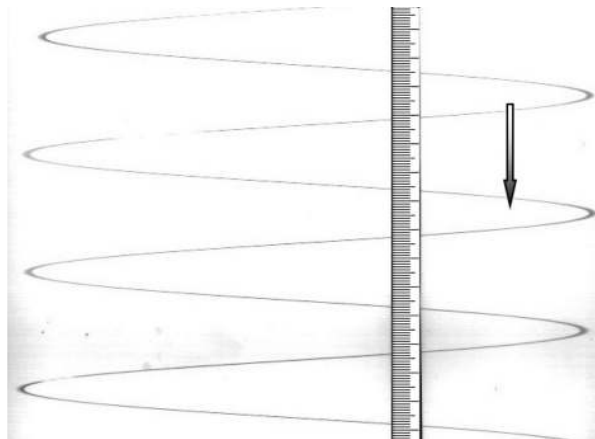


Рис. 1

Рис. 2

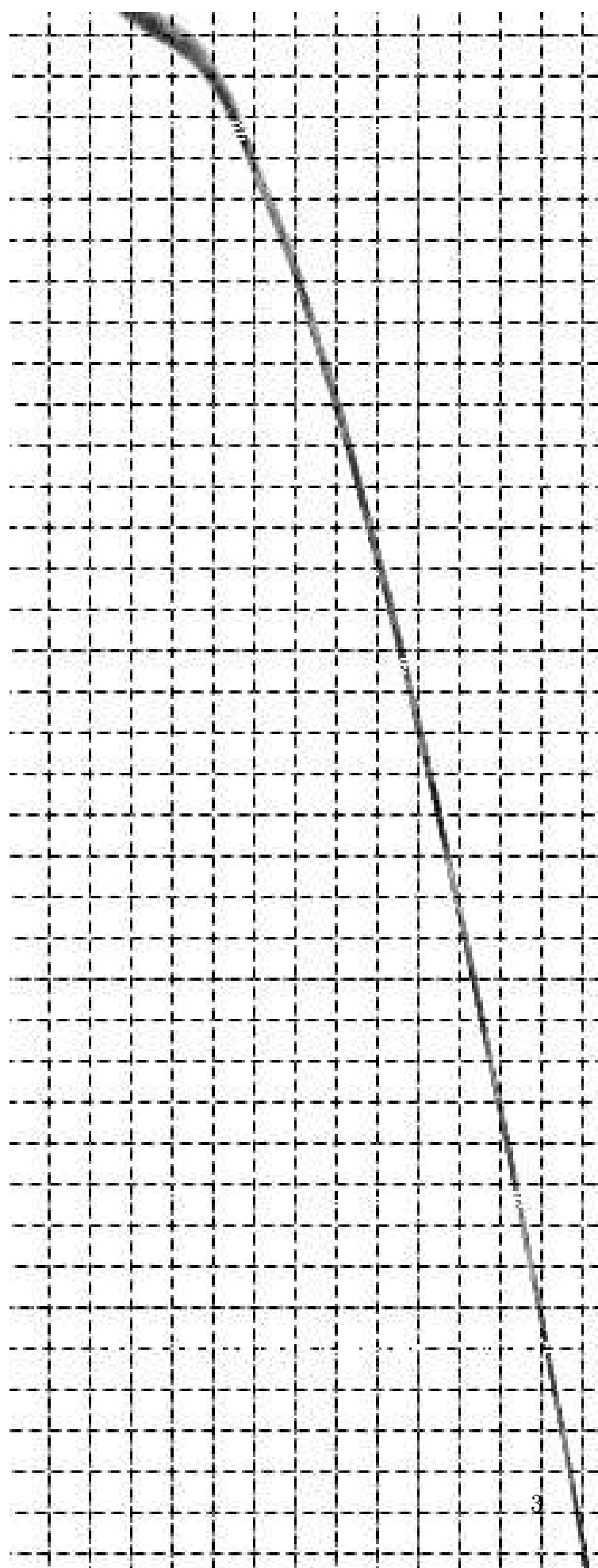


Рис. 3

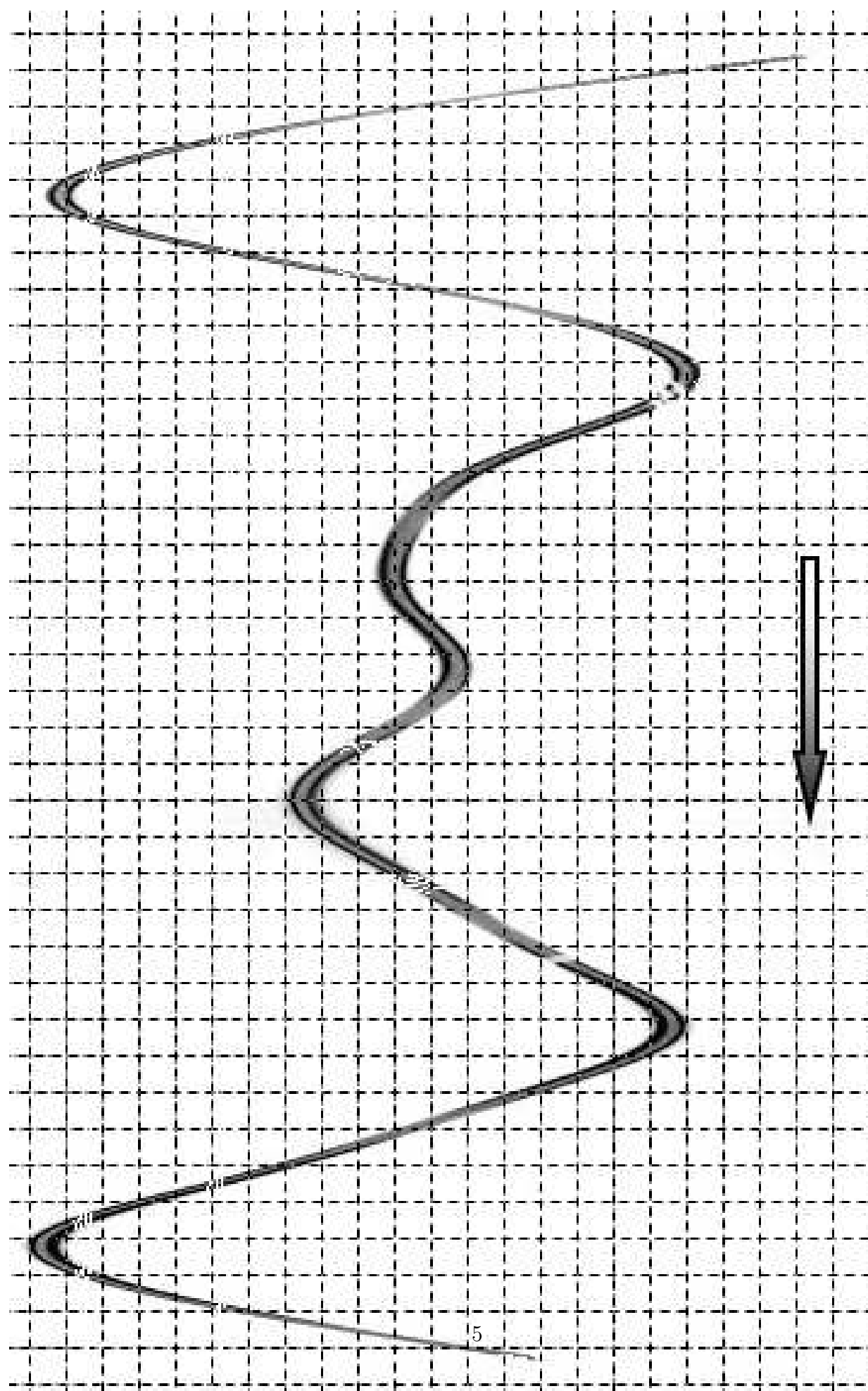


Рис. 4

Рис. 5

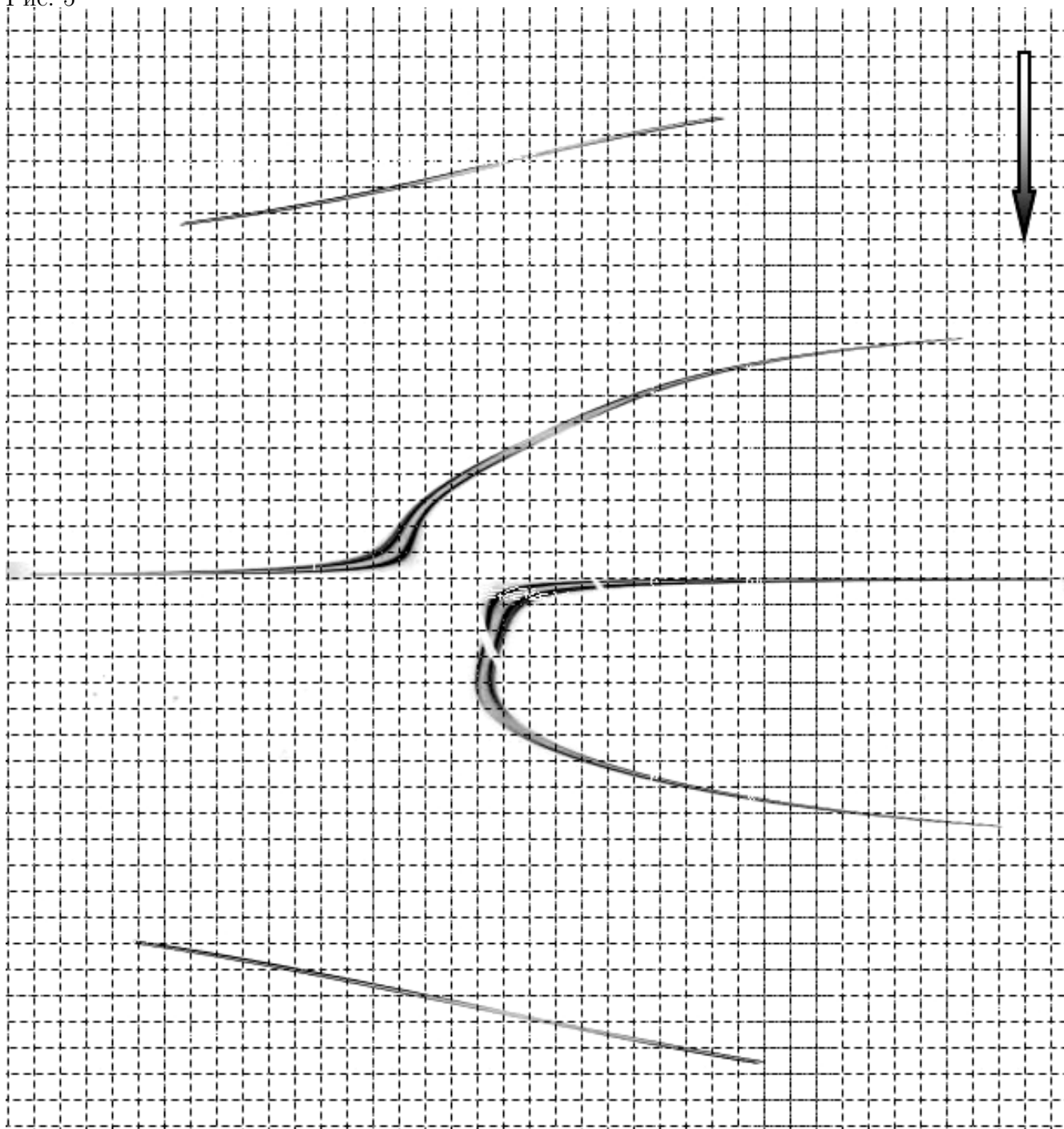
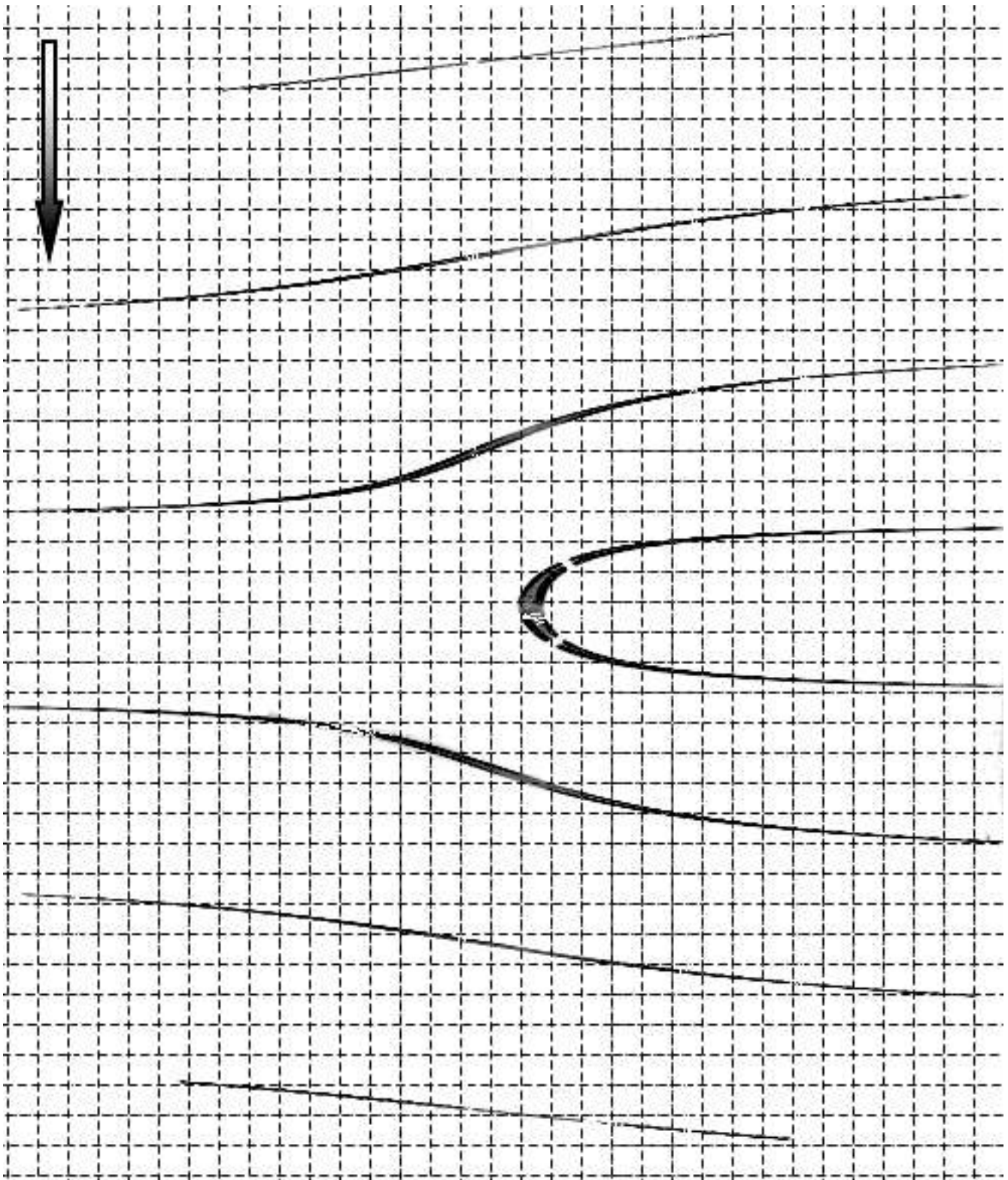


Рис. 6



Решение

Задача 9- 3. «Не забудьте посолить»

Часть 1. Фактор первый

1.1 Уравнение теплового баланса:

$$c_B m_B \Delta t = c_C m_C (t_K - \Delta t - t_C) \quad (1)$$

Откуда:

$$\Delta t = \frac{c_C m_C (t_K - t_C)}{c_B m_B + c_C m_C} \quad (2)$$

1.2 Согласно правилу смешения:

$$c(m_B + m_C) = c_B m_B + c_C m_C \quad (3)$$

Разделим обе части уравнения на  $c_B + c_C$  и заметим, что  $\frac{m_C}{m_B + m_C} = \eta$ , а  $\frac{m_B}{m_B + m_C} = 1 - \eta$ . Получим:

$$c = c_B(1 - \eta) + c_C \eta = c_B - (c_B - c_C)\eta \quad (4)$$

Таким образом, зависимость удельной теплоемкости раствора от концентрации является линейной с коэффициентом наклона  $k = c_B - c_C$ . График зависимости  $c(\eta)$  представлен на рис. 1.

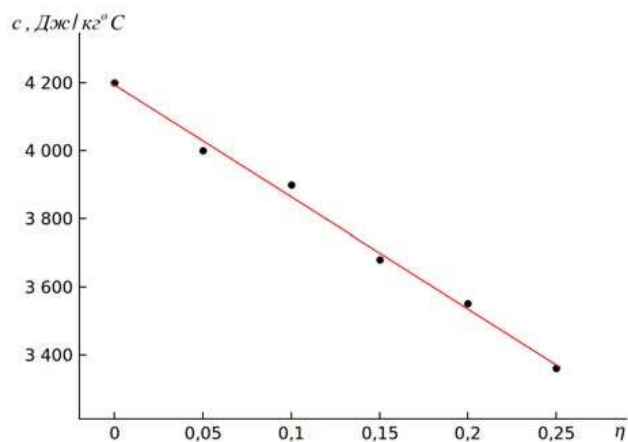


Рис. 1. График зависимости  $c(\eta)$  Коэффициент  $k = 3300$  Дж/кг·°С, откуда  $c_C = 900$  Дж/кг·°С.

1.3 Изменение температуры воды в первом случае:

$$\Delta t_1 = 0,34^\circ\text{C} \quad (5)$$

во втором:

$$\Delta t_2 = 4,8^\circ\text{C} \quad (6)$$

## Часть 2. Фактор второй

2.1 В таблице не приведены значения удельной теплоты растворения для  $m_{C1} = 20$ г и  $m_{C2} = 300$ г. Получить необходимые значения можно проведя линейную интерполяцию, т. е. считая что на каждом интервале удельная теплота растворения изменяется линейно:

$$q = am_C + b \quad (7)$$

Для интервала (10; 50), получим:

$$72,3 = 10a + b \quad (8)$$

$$66,2 = 50a + b$$



откуда:  $a = -0,153 \text{ кДж/кг} \cdot \text{г}$ ,  $b = 73,8 \text{ кДж/кг}$ . Для  $m_{C1} = 20\text{г}$  получаем:

$$q_1 = 20a + b = 70,8 \text{ кДж/кг} \quad (9)$$

Для  $m_{C2} = 300\text{г}$ , интерполяция дает значение:

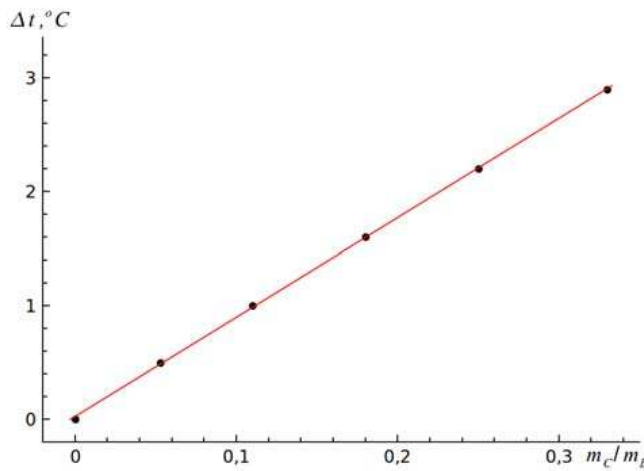
$$q_2 = 35,6 \text{ кДж/кг} \quad (10)$$

На растворение соли требуется количество теплоты равное  $q m_C$ . Уравнение теплового баланса:

$$q m_C = (c_B m_B + c_C m_C) \Delta t \quad (11)$$

Откуда, для  $m_{C1} = 20\text{г}$  получаем:  $\Delta t_1 = 0,34^\circ\text{C}$  (12) для  $m_{C2} = 300\text{г}$ :  $\Delta t_2 = 1,5^\circ\text{C}$  (13)

### Часть 3. Фактор третий



3.1 Концентрация раствора  $\eta = \frac{m_C}{m_B + m_C} = \frac{1}{1 + \frac{m_C}{m_B}}$ , откуда:

$$\frac{m_C}{m_B} = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (14)$$

Дополним таблицу колонками  $\frac{m_C}{m_B}$  и  $\Delta t$ .

| $\eta, \%$ | $\frac{m_C}{m_B}$ | $t_k, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ |
|------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0          | 0                 | 100                   | 0                          |
| 5          | 0,053             | 100,5                 | 0,5                        |
| 10         | 0,11              | 101,0                 | 1,0                        |
| 15         | 0,18              | 101,6                 | 1,6                        |
| 20         | 0,25              | 102,2                 | 2,2                        |
| 25         | 0,33              | 102,9                 | 2,9                        |

Таблица 3. Температуры кипения раствора соли

| $\eta, \%$ | $\frac{m_C}{m_B}$ | $t_K, ^\circ\text{C}$ | $\Delta t, ^\circ\text{C}$ |
|------------|-------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0          | 0                 | 100                   | 0                          |
| 5          | 0,053             | 100,5                 | 0,5                        |
| 10         | 0,11              | 101,0                 | 1,0                        |
| 15         | 0,18              | 101,6                 | 1,6                        |
| 20         | 0,25              | 102,2                 | 2,2                        |
| 25         | 0,33              | 102,9                 | 2,9                        |

График зависимости  $\Delta t \left( \frac{m_C}{m_B} \right)$  изображен на рис. 2. Коэффициент  $\alpha = 8,7^\circ\text{C}$ .

3.2 Для  $m_{C1} = 20\text{г}$  получаем:  $\Delta t_1 = 0,17^\circ\text{C}$  (15), для  $m_{C2} = 300\text{г}$ :  $\Delta t_2 = 2,6^\circ\text{C}$  (16).

#### Часть 4. Когда же снова закипит?

4.1 Для оценки достаточно определить суммарный эффект. Для  $m_{C1} = 20\text{г}$  получаем:

$$\Delta t_{\text{СУММ1}} = 0,85^\circ\text{C} \quad (17)$$

поэтому вода закипит через время:

$$t_1 = \frac{300c}{80^\circ\text{C}} \cdot 0,85^\circ\text{C} \approx 3c \quad (18)$$

Для  $m_{C2} = 300\text{г}$ :

$$\Delta t_{\text{СУММ2}} = 8,9^\circ\text{C} \quad (19)$$

поэтому вода закипит через время:

$$t_1 = \frac{300c}{80^\circ\text{C}} \cdot 8,9^\circ\text{C} \approx 33c \quad (20)$$

