

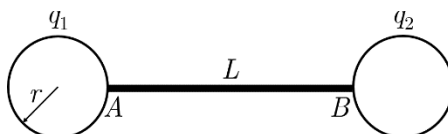
ВСЕРОССИЙСКАЯ ОЛИМПИАДА ШКОЛЬНИКОВ  
ФИЗИКА. 2026–2027 уч. г.  
ШКОЛЬНЫЙ ЭТАП. 11 КЛАСС

**ОТВЕТЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ**

**Максимальный балл за работу – 30.**

**Задание 1. Вариант 1.**

Два диэлектрических шарика одинакового радиуса  $r = 12$  мм закреплены на концах тонкого диэлектрического стержня длиной  $L = AB = 25$  см. По объёму одного шарика равномерно распределили заряд  $q_1 = +2$  нКл, по объёму другого – заряд  $q_2 = -4$  нКл. Считайте, что шарики расположены в идеальной непроводящей среде. Значение постоянного коэффициента в законе Кулона  $k = 9 \cdot 10^9$  Н·м<sup>2</sup>/Кл<sup>2</sup>.



а) Как взаимодействуют между собой шарики с зарядами  $q_1$  и  $q_2$ ?

**Ответ:**

- ✓ Притягиваются
- Отталкиваются
- Не взаимодействуют
- Могут как притягиваться, так и отталкиваться

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 1 балл.

б) Определите величину (модуль) силы электростатического взаимодействия шариков сразу после размещения зарядов на них. Ответ выразите в микроньютонах, округлите до сотых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне  $[0.95; 0.97]$

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

в) Определите модуль разности потенциалов между точками  $A$  и  $B$  – концами диэлектрического стержня сразу после размещения зарядов на шариках. Ответ выразите в киловольтах, округлите до десятых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне  $[4.2; 4.4]$

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 3 балла.

г) Диэлектрический стержень обладает гигантским сопротивлением  $R = 500$  ГОм. Тем не менее, по нему заряды могут перетекать от одного шарика к другому. Определите силу тока в стержне сразу после того, как шарики зарядили. Ответ выразите в наноамперах, округлите до десятых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне [8.5; 8.7]

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

д) Спустя длительное время система зарядов приходит в равновесие и ток исчезает. Какой суммарный заряд перетечёт по стержню к моменту установления равновесия? Ответ выразите в нанокулонах, округлите до десятых.

**Ответ:** 3.0

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

**Максимальный балл за задание – 10.**

**Решение.**

а) Заряды шариков имеют разные знаки, поэтому шарики притягиваются.

б) Расстояние между центрами шариков равно длине стержня плюс два радиуса:

$$d = L + 2r = 0.25 + 2 \cdot 0.012 = 0.274 \text{ м.}$$

По закону Кулона модуль силы взаимодействия

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{d^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 10^{-9}}{0.274^2} = 0.9590 \text{ мкН} \approx 0.96 \text{ мкН.}$$

в) Точка  $A$  находится на поверхности первого шарика, а точка  $B$  – на поверхности второго. Расстояния от центров шариков до ближних к ним концов стержня равны  $r$ , до дальних –  $L + r$ . Потенциалы этих точек:

$$\varphi_A = k \frac{q_1}{r} + k \frac{q_2}{L + r}, \quad \varphi_B = k \frac{q_2}{r} + k \frac{q_1}{L + r}.$$

Модуль разности потенциалов

$$|\Delta\varphi| = k|q_1 - q_2| \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{L + r} \right) = 9 \cdot 10^9 \cdot 6 \cdot 10^{-9} \left( \frac{1}{0.012} - \frac{1}{0.262} \right) \approx 4284 \text{ В} \approx 4.3 \text{ кВ.}$$

г) По закону Ома сила тока сразу после зарядки шариков

$$I = \frac{|\Delta\varphi|}{R} = \frac{4284}{500 \cdot 10^9} = 8.568 \cdot 10^{-9} \text{ А} \approx 8.6 \text{ нА.}$$

д) В равновесии потенциалы точек  $A$  и  $B$  одинаковы. Благодаря симметрии это достигается при равных зарядах шариков. По закону сохранения заряда

$$q'_1 = q'_2 = \frac{q_1 + q_2}{2} = \frac{2 - 4}{2} = -1 \text{ нКл.}$$

Модуль перетёкшего заряда равен изменению заряда первого шарика:

$$|\Delta q| = |q'_1 - q_1| = |-1 - 2| = 3.0 \text{ нКл.}$$

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 1.**

| №<br>варианта | $r$ , мм | $L$ , см | $q_1$ , нКл | $q_2$ , нКл | $R$ , ГОм | Ответ (пункт а) | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт б) |      |
|---------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------------------------|------|
| 1             | 12       | 25       | 2           | −4          | 500       | Притягиваются   | 0.95                              | 0.97 |
| 2             | 8        | 30       | 1           | 3           | 700       | Отталкиваются   | 0.26                              | 0.28 |
| 3             | 17       | 42       | 9           | 4           | 185       | Отталкиваются   | 1.56                              | 1.58 |
| 4             | 14       | 14       | −6          | 2           | 820       | Притягиваются   | 3.82                              | 3.84 |
| 5             | 6        | 20       | −3          | −4          | 300       | Отталкиваются   | 2.39                              | 2.41 |
| 6             | 10       | 32       | 8           | −4          | 460       | Притягиваются   | 2.48                              | 2.50 |
| 7             | 15       | 35       | −7          | −10         | 250       | Отталкиваются   | 4.35                              | 4.37 |
| 8             | 11       | 18       | −3          | 4           | 620       | Притягиваются   | 2.64                              | 2.66 |
| 9             | 9        | 24       | 5           | −1          | 330       | Притягиваются   | 0.67                              | 0.69 |
| 10            | 12       | 36       | 6           | 2           | 155       | Отталкиваются   | 0.72                              | 0.74 |
| 11            | 13       | 28       | −5          | −7          | 115       | Отталкиваются   | 3.35                              | 3.37 |
| 12            | 16       | 22       | −8          | 4           | 590       | Притягиваются   | 4.53                              | 4.55 |
| 13            | 8        | 34       | 4           | 5           | 120       | Отталкиваются   | 1.41                              | 1.43 |
| 14            | 14       | 19       | −6          | 3           | 800       | Притягиваются   | 3.40                              | 3.42 |
| 15            | 15       | 45       | −7          | −2          | 290       | Отталкиваются   | 0.54                              | 0.56 |
| 16            | 17       | 34       | 7           | 3           | 430       | Отталкиваются   | 1.34                              | 1.36 |
| 17            | 16       | 30       | 4           | −5          | 850       | Притягиваются   | 1.62                              | 1.64 |
| 18            | 10       | 27       | −5          | 3           | 720       | Притягиваются   | 1.60                              | 1.62 |
| 19            | 9        | 21       | 6           | −4          | 890       | Притягиваются   | 4.15                              | 4.17 |
| 20            | 13       | 26       | 6           | 2           | 560       | Отталкиваются   | 1.31                              | 1.33 |

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 1.**

| №<br>варианта | $r$ , мм | $L$ , см | $q_1$ , нКл | $q_2$ , нКл | $R$ , ГОм | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт в) |      | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт г) |      |
|---------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------------------------------|------|-----------------------------------|------|
|               |          |          |             |             |           |                                   |      |                                   |      |
| 1             | 12       | 25       | 2           | −4          | 500       | 4.2                               | 4.4  | 8.5                               | 8.7  |
| 2             | 8        | 30       | 1           | 3           | 700       | 2.1                               | 2.3  | 3.0                               | 3.2  |
| 3             | 17       | 42       | 9           | 4           | 185       | 2.4                               | 2.6  | 13.7                              | 13.9 |
| 4             | 14       | 14       | −6          | 2           | 820       | 4.6                               | 4.8  | 5.6                               | 5.8  |
| 5             | 6        | 20       | −3          | −4          | 300       | 1.4                               | 1.6  | 4.8                               | 5.0  |
| 6             | 10       | 32       | 8           | −4          | 460       | 10.4                              | 10.6 | 22.7                              | 22.9 |
| 7             | 15       | 35       | −7          | −10         | 250       | 1.6                               | 1.8  | 6.8                               | 7.0  |
| 8             | 11       | 18       | −3          | 4           | 620       | 5.3                               | 5.5  | 8.6                               | 8.8  |
| 9             | 9        | 24       | 5           | −1          | 330       | 5.7                               | 5.9  | 17.4                              | 17.6 |
| 10            | 12       | 36       | 6           | 2           | 155       | 2.8                               | 3.0  | 18.6                              | 18.8 |
| 11            | 13       | 28       | −5          | −7          | 115       | 1.2                               | 1.4  | 11.4                              | 11.6 |
| 12            | 16       | 22       | −8          | 4           | 590       | 6.2                               | 6.4  | 10.6                              | 10.8 |
| 13            | 8        | 34       | 4           | 5           | 120       | 1.0                               | 1.2  | 9.1                               | 9.3  |
| 14            | 14       | 19       | −6          | 3           | 800       | 5.3                               | 5.5  | 6.6                               | 6.8  |
| 15            | 15       | 45       | −7          | −2          | 290       | 2.8                               | 3.0  | 9.9                               | 10.1 |
| 16            | 17       | 34       | 7           | 3           | 430       | 1.9                               | 2.1  | 4.6                               | 4.8  |
| 17            | 16       | 30       | 4           | −5          | 850       | 4.7                               | 4.9  | 5.6                               | 5.8  |
| 18            | 10       | 27       | −5          | 3           | 720       | 6.8                               | 7.0  | 9.5                               | 9.7  |
| 19            | 9        | 21       | 6           | −4          | 890       | 9.5                               | 9.7  | 10.7                              | 10.9 |
| 20            | 13       | 26       | 6           | 2           | 560       | 2.5                               | 2.7  | 4.6                               | 4.8  |

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 1.**

| № варианта | $r$ , мм | $L$ , см | $q_1$ , нКл | $q_2$ , нКл | $R$ , ГОм | Ответ<br>(пункт д) |
|------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|--------------------|
| 1          | 12       | 25       | 2           | −4          | 500       | 3.0                |
| 2          | 8        | 30       | 1           | 3           | 700       | 1.0                |
| 3          | 17       | 42       | 9           | 4           | 185       | 2.5                |
| 4          | 14       | 14       | −6          | 2           | 820       | 4.0                |
| 5          | 6        | 20       | −3          | −4          | 300       | 0.5                |
| 6          | 10       | 32       | 8           | −4          | 460       | 6.0                |
| 7          | 15       | 35       | −7          | −10         | 250       | 1.5                |
| 8          | 11       | 18       | −3          | 4           | 620       | 3.5                |
| 9          | 9        | 24       | 5           | −1          | 330       | 3.0                |
| 10         | 12       | 36       | 6           | 2           | 155       | 2.0                |
| 11         | 13       | 28       | −5          | −7          | 115       | 1.0                |
| 12         | 16       | 22       | −8          | 4           | 590       | 6.0                |
| 13         | 8        | 34       | 4           | 5           | 120       | 0.5                |
| 14         | 14       | 19       | −6          | 3           | 800       | 4.5                |
| 15         | 15       | 45       | −7          | −2          | 290       | 2.5                |
| 16         | 17       | 34       | 7           | 3           | 430       | 2.0                |
| 17         | 16       | 30       | 4           | −5          | 850       | 4.5                |
| 18         | 10       | 27       | −5          | 3           | 720       | 4.0                |
| 19         | 9        | 21       | 6           | −4          | 890       | 5.0                |
| 20         | 13       | 26       | 6           | 2           | 560       | 2.0                |

## Задание 2. Вариант 1.

Учитель ведёт урок в закрытом кабинете объёмом  $V = 220 \text{ м}^3$ . В кабинете находятся  $N = 19$  человек (18 учеников и сам учитель). Температура воздуха в помещении равна  $t = 23^\circ\text{C}$  и остаётся постоянной на протяжении всего урока. Начальная относительная влажность воздуха  $\varphi_0 = 30 \%$ .

Люди, находящиеся в кабинете, увеличивают влажность воздуха за счёт дыхания и испарения влаги с поверхности кожи. Считайте, что за  $\tau = 45$  мин урока каждый человек выделяет в воздух  $m = 40$  г водяного пара. Считайте давление водяного пара по всему объёму одинаковым. Кабинет считайте герметичным.

При расчётах используйте следующие значения:

- универсальная газовая постоянная  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;
- молярная масса водяного пара  $M = 18 \text{ г/моль}$ ;
- давление насыщенного водяного пара при температуре  $t = 23^\circ\text{C}$  равно  $p_{\text{нас}} = 2,81 \text{ кПа}$ ;
- плотность воды  $\rho = 1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ ;
- абсолютный нуль температуры  $t_0 = -273^\circ\text{C}$ .

а) На сколько процентных пунктов увеличится относительная влажность воздуха в кабинете за 45 минут? Например, если начальная влажность была 20 %, а стала 28 %, ответом является 8. Ответ округлите до десятых. Считайте, что конденсация пара не происходит — вся испарившаяся вода остаётся в воздухе.

**Ответ:** 16,8

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

б) Каким при этом станет парциальное давление водяного пара? Дайте ответ в кПа с округлением до сотых долей.

**Ответ:** 1,32

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

в) Дело происходит зимой, поэтому температура воздуха вблизи оконного стекла значительно ниже, чем в основной части кабинета, и составляет  $t_{\text{ст}} = 13,2^\circ\text{C}$ .

Давление насыщенного водяного пара (в кПа) зависит от температуры  $t$  в градусах Цельсия по формуле Магнуса:

$$p_{\text{нас}}(t) = 0,611 \text{ кПа} \cdot e^{\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}}$$

Чему равно давление насыщенного водяного пара при температуре  $t_{\text{ст}}$ ? Ответ выразите в килопаскалях, округлите до сотых.

**Ответ:** 1,52

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

г) Во время перемены учитель и все ребята остались на своих местах, чтобы обсудить подготовку к празднику, а сразу после обсуждения начался второй урок. Через какое время после начала первого урока окна начнут запотевать? Ответ выразите в минутах, округлите до целых.

Считайте, что скорость испарения воды остаётся неизменной, а конденсация начинается, как только давление водяного пара у окна достигает давления насыщенного пара при температуре стекла.

**Ответ:** 64

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

д) После начала запотевания концентрация водяного пара вблизи окон и в остальной части помещения может различаться: у стекла она остаётся на уровне насыщения, а в основной части помещения может продолжать увеличиваться. Считайте, что всё тепло, выделяющееся при конденсации, отводится через оконное стекло на улицу, при этом температуры стекла и воздуха в помещении остаются постоянными.

Мощность тепловых потерь через окна составляет  $P = 200$  Вт. Удельная теплота парообразования (конденсации) воды равна  $L = 2,45$  МДж/кг. Определите скорость конденсации воды на окнах. Ответ выразите в мл/мин, округлите до десятых.

**Ответ:** 4,9

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

**Максимальный балл за задание – 10 баллов.**

**Решение.**

**а)** За 45 минут люди в кабинете испаряют массу воды  $m' = Nm$  при температуре  $T = t - t_0$ . В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона изменение парциального давления водяного пара равно

$$\Delta p = \frac{m' RT}{M V} = \frac{Nm R(t - t_0)}{M V}$$

Тогда изменение влажности воздуха по определению относительной влажности

$$\Delta \varphi = \frac{\Delta p}{p_{\text{нас}}} 100\% = \frac{NmR(t - t_0)}{Mp_{\text{нас}}V} = 16,8 \, \%.$$

**б)** Парциальное давление водяного пара в таком случае:

$$p = (\varphi_0 + \Delta \varphi)p_{\text{нас}} = 1,32 \text{ кПа}.$$

**в)** Подставим температуру стекла в формулу Магнуса

$$p'_{\text{нас}} = 0,611 \text{ кПа} \cdot e^{\frac{17,27 \cdot t}{t + 237,3}} = 1,52 \text{ кПа}.$$

**г)** Конденсация начинается, когда давление водяного пара у стекла достигает давления насыщенного водяного пара при температуре стекла. Считая скорость изменения давления  $\frac{dp}{d\tau} = \frac{\Delta \varphi p_{\text{нас}}}{\tau}$  постоянной (ведь увеличение массы водяного пара в процессе испарения и дыхания идет с постоянной скоростью), получаем:

$$\tau' = \frac{\Delta p}{dp/d\tau} = \frac{p'_{\text{нас}} - \varphi_0 p_{\text{нас}}}{\Delta \varphi p_{\text{нас}}/\tau} = 64 \text{ мин}.$$

**д)** При конденсации выделяется теплота, отводимая наружу с мощностью  $P$ . Объемная скорость конденсации

$$V = \frac{P}{L\rho} = 4,9 \frac{\text{мл}}{\text{мин}}.$$

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 2.**

| №<br>вари<br>анта | $V, \text{м}^3$ | N  | N' | $t_{\text{ст}},$<br>°C | $\varphi_0,$<br>% | $m,$<br>г | $P,$<br>Вт | $\Delta\varphi,$<br>% | $p,$<br>кПа | $p',$<br>кПа | $\tau'$ | $V,$<br>мл |
|-------------------|-----------------|----|----|------------------------|-------------------|-----------|------------|-----------------------|-------------|--------------|---------|------------|
| 1                 | 220             | 19 | 18 | 13,2                   | 30                | 40        | 200        | 16,8%                 | 1,32        | 1,52         | 64      | 4,9        |
| 2                 | 180             | 21 | 20 | 14,5                   | 32                | 35        | 400        | 19,9%                 | 1,46        | 1,65         | 61      | 9,8        |
| 3                 | 230             | 23 | 22 | 12,4                   | 25                | 50        | 250        | 24,3%                 | 1,39        | 1,44         | 49      | 6,1        |
| 4                 | 190             | 16 | 15 | 13,8                   | 35                | 40        | 300        | 16,4%                 | 1,44        | 1,58         | 58      | 7,3        |
| 5                 | 200             | 26 | 25 | 11,7                   | 22                | 45        | 350        | 28,4%                 | 1,42        | 1,38         | 43      | 8,6        |
| 6                 | 170             | 18 | 17 | 14,1                   | 28                | 38        | 180        | 19,6%                 | 1,34        | 1,61         | 67      | 4,4        |
| 7                 | 240             | 29 | 28 | 15,3                   | 33                | 39        | 450        | 22,9%                 | 1,57        | 1,74         | 57      | 11,0       |
| 8                 | 155             | 20 | 19 | 12,8                   | 21                | 48        | 220        | 30,1%                 | 1,44        | 1,48         | 47      | 5,4        |
| 9                 | 210             | 25 | 24 | 14,8                   | 29                | 43        | 480        | 24,9%                 | 1,51        | 1,68         | 56      | 11,8       |
| 10                | 250             | 31 | 30 | 13,5                   | 24                | 32        | 160        | 19,3%                 | 1,22        | 1,55         | 72      | 3,9        |
| 11                | 175             | 17 | 16 | 13                     | 35                | 39        | 420        | 18,4%                 | 1,50        | 1,50         | 45      | 10,3       |
| 12                | 195             | 28 | 27 | 15,6                   | 23                | 47        | 280        | 32,8%                 | 1,57        | 1,77         | 55      | 6,9        |
| 13                | 165             | 22 | 21 | 14,3                   | 31                | 36        | 330        | 23,3%                 | 1,53        | 1,63         | 52      | 8,1        |
| 14                | 225             | 30 | 29 | 11,3                   | 27                | 33        | 380        | 21,4%                 | 1,36        | 1,34         | 43      | 9,3        |
| 15                | 185             | 24 | 23 | 13,9                   | 23                | 50        | 270        | 31,5%                 | 1,53        | 1,59         | 48      | 6,6        |
| 16                | 160             | 27 | 26 | 15,9                   | 23                | 45        | 310        | 36,9%                 | 1,68        | 1,81         | 50      | 7,6        |
| 17                | 205             | 19 | 18 | 10,8                   | 32                | 34        | 460        | 15,3%                 | 1,33        | 1,30         | 41      | 11,3       |
| 18                | 235             | 16 | 15 | 14,6                   | 34                | 54        | 200        | 17,9%                 | 1,46        | 1,66         | 63      | 4,9        |
| 19                | 215             | 29 | 28 | 11,9                   | 21                | 33        | 430        | 21,6%                 | 1,20        | 1,39         | 59      | 10,5       |
| 20                | 245             | 31 | 30 | 12,2                   | 30                | 31        | 500        | 19,1%                 | 1,38        | 1,42         | 49      | 12,2       |

### Задание 3. Вариант 1.

Основным источником энергии на металлургических заводах XVIII века была энергия падающей воды. Обычно на реке строили плотину. Вода накапливалась в образовавшемся водоёме, а затем по специальным водоводам с высоты падала на водобойное колесо. Колесо, вращаясь, поворачивало вал. На другом конце вала имелось несколько выступов, которые по очереди упирались в конец рукоятки большого молота. Рукоятка



поворачивалась относительно неподвижной оси, и массивная рабочая часть молота поднималась вверх. Когда выступ соскальзывал с рукоятки, молот падал вниз и рабочей частью ударял по наковальне, располагаясь в этот момент горизонтально.

Даны характеристики завода в городе  $N$ .

**Плотина:** перепад высот между верхним краем плотины и осью колеса составляет  $H = 6$  м. Объёмный расход воды, падающей на колесо, равен  $Q = 40$  л/с. Скоростью воды в верхней части плотины пренебрегите, так как водохранилище имеет большую площадь.

**Водяное колесо:** радиус  $R = 3.5$  м. Скорость, с которой движутся крайние точки колеса,  $v = 1.6$  м/с.

**Молот:** масса рабочей части  $m = 100$  кг, длина рукоятки  $L = 5$  м. Ось вращения молота делит рукоятку в отношении  $1 : 4$  (как на рисунке). Массой рукоятки по сравнению с массой рабочей части пренебрегите.

Плотность воды  $\rho = 1000$  кг/м<sup>3</sup>, ускорение свободного падения примите равным  $g = 9.8$  м/с<sup>2</sup>,  $\pi = 3.14$ .

а) Чему равно изменение потенциальной энергии воды, падающей с края плотины на уровень оси колеса за время  $t = 1$  с? Ответ выразите в килоджоулях, округлите до сотых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне  $[2.34; 2.36]$

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 1 балл.

**б)** Столкновение воды с лопастями колеса можно считать абсолютно неупругим. Какое максимальное количество энергии (механической и тепловой) вода может передать колесу за время  $t = 1$  с? Ответ выразите в килоджоулях, округлите до сотых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне [2.29; 2.31]

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

**в)** Во время работы молота его рукоятка поворачивается на максимальный угол  $\alpha = 30^\circ$  относительно горизонтального положения. Какая энергия при этом запасается в рабочей части молота за один подъём? Ответ выразите в килоджоулях, округлите до сотых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне [1.95; 1.97]

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

**г)** До какой скорости разгоняется рабочая часть молота при падении на наковальню? Силу трения в осях и сопротивление воздуха не учитывайте. Ответ выразите в м/с, округлите до десятых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне [6.2; 6.4]

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 2 балла.

**д)** Чему равно КПД всего этого устройства (колесо и молот), если за один оборот колеса молот поднимается на максимальную высоту четыре раза? Полезной энергией считайте энергию удара молота, а затраченной – изменение потенциальной энергии воды. Ответ выразите в процентах, округлите до десятых.

**Ответ:** засчитывается в диапазоне [24.1; 24.5]

**Критерий оценивания:** точное совпадение ответа – 3 балла.

**Максимальный балл за задание – 10.**

**Решение.**

**а)** Примем уровень оси колеса за нулевой уровень потенциальной энергии. За время  $t$  с плотины падает масса воды  $m_v = \rho Q t$ . Изменение её потенциальной энергии при падении

$$\Delta E_p = m_v g H = \rho Q t g H = 1000 \cdot 0.04 \cdot 1 \cdot 9.8 \cdot 6 = 2352 \text{ Дж} \approx 2.35 \text{ кДж}.$$

б) При абсолютно неупругом столкновении вода после удара движется со скоростью лопастей  $v$ . Её оставшаяся кинетическая энергия  $E_k = m_v v^2 / 2 = \rho Q t v^2 / 2$ . Энергию, переданную колесу, получим вычитанием:

$$E = \Delta E_p - E_k = \rho Q t g H - \frac{\rho Q t v^2}{2} = 2301 \text{ Дж} \approx 2.30 \text{ кДж}.$$

в) При подъёме рабочая часть молота запасает потенциальную энергию  $E_{p,м} = m g h$ . Ось делит рукоятку в отношении 1 : 4, поэтому расстояние от оси до рабочей части равно  $4L/5$ . Высота подъёма  $h = (4L/5) \sin \alpha$ , откуда

$$E_{p,м} = m g \frac{4}{5} L \sin \alpha = 100 \cdot 9.8 \cdot \frac{4}{5} \cdot 5 \cdot 0.5 = 1960 \text{ Дж} = 1.96 \text{ кДж}.$$

г) При падении без потерь запасённая потенциальная энергия переходит в кинетическую:

$$m g \frac{4}{5} L \sin \alpha = \frac{m u^2}{2}, \quad u = \sqrt{\frac{8}{5} g L \sin \alpha} = \sqrt{\frac{8}{5} \cdot 9.8 \cdot 5 \cdot 0.5} \approx 6.3 \text{ м/с}.$$

д) Полезная энергия за один оборот колеса равна четырём энергиям подъёма молота,  $A_{п} = 4 E_{p,м}$ . Период вращения колеса  $T = 2\pi R / v$ ; за это время вода отдаёт потенциальную энергию  $A_3 = \rho Q T g H$ . Поэтому

$$\eta = \frac{A_{п}}{A_3} \cdot 100\% = \frac{4 m g \frac{4}{5} L \sin \alpha}{\rho Q \frac{2\pi R}{v} g H} \cdot 100\% \approx 24.3\%.$$

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 3.**

| №<br>варианта | $H$ , м | $Q$ , л/с | $R$ , м | $v$ , м/с | $m$ , кг | $L$ , м | $\alpha$ , ° | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт а) |      |
|---------------|---------|-----------|---------|-----------|----------|---------|--------------|-----------------------------------|------|
| 1             | 6       | 40        | 3.5     | 1.6       | 100      | 5       | 30           | 2.34                              | 2.36 |
| 2             | 5       | 41        | 4       | 1.7       | 110      | 5.1     | 31           | 2.00                              | 2.02 |
| 3             | 5.25    | 42        | 4.25    | 1.8       | 120      | 5.2     | 32           | 2.15                              | 2.17 |
| 4             | 5.5     | 43        | 4.5     | 1.9       | 130      | 5.3     | 33           | 2.31                              | 2.33 |
| 5             | 5.75    | 44        | 4.75    | 2         | 140      | 5.4     | 34           | 2.47                              | 2.49 |
| 6             | 6       | 45        | 5       | 2.1       | 150      | 5.5     | 35           | 2.64                              | 2.66 |
| 7             | 6.25    | 46        | 5.25    | 2.2       | 160      | 5.6     | 36           | 2.81                              | 2.83 |
| 8             | 6.5     | 47        | 5.5     | 2.3       | 170      | 5.7     | 37           | 2.98                              | 3.00 |
| 9             | 6.75    | 48        | 5.75    | 2.4       | 180      | 5.8     | 38           | 3.17                              | 3.19 |
| 10            | 7       | 49        | 6       | 2.5       | 190      | 5.9     | 39           | 3.35                              | 3.37 |
| 11            | 7.25    | 50        | 6.25    | 2.6       | 200      | 6       | 30           | 3.54                              | 3.56 |
| 12            | 7.5     | 51        | 6.5     | 2.7       | 190      | 6.1     | 31           | 3.74                              | 3.76 |
| 13            | 7.75    | 52        | 6.75    | 2.8       | 180      | 6.2     | 32           | 3.94                              | 3.96 |
| 14            | 8       | 53        | 7       | 2.9       | 170      | 6.3     | 33           | 4.15                              | 4.17 |
| 15            | 8.25    | 54        | 7.25    | 3         | 200      | 6.4     | 34           | 4.36                              | 4.38 |
| 16            | 8.5     | 55        | 7.5     | 3.1       | 190      | 6.5     | 35           | 4.57                              | 4.59 |
| 17            | 8.75    | 56        | 7.75    | 3.2       | 180      | 6.6     | 36           | 4.79                              | 4.81 |
| 18            | 9       | 57        | 8       | 3.3       | 170      | 6.7     | 37           | 5.02                              | 5.04 |
| 19            | 9.25    | 58        | 8.25    | 3.4       | 200      | 6.8     | 38           | 5.25                              | 5.27 |
| 20            | 9.5     | 59        | 8.5     | 3.5       | 190      | 6.9     | 39           | 5.48                              | 5.50 |

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 3.**

| №<br>варианта | $H$ , м | $Q$ , л/с | $R$ , м | $v$ , м/с | $m$ , кг | $L$ , м | $\alpha$ , ° | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт б) |      |
|---------------|---------|-----------|---------|-----------|----------|---------|--------------|-----------------------------------|------|
| 1             | 6       | 40        | 3.5     | 1.6       | 100      | 5       | 30           | 2.29                              | 2.31 |
| 2             | 5       | 41        | 4       | 1.7       | 110      | 5.1     | 31           | 1.94                              | 1.96 |
| 3             | 5.25    | 42        | 4.25    | 1.8       | 120      | 5.2     | 32           | 2.08                              | 2.10 |
| 4             | 5.5     | 43        | 4.5     | 1.9       | 130      | 5.3     | 33           | 2.23                              | 2.25 |
| 5             | 5.75    | 44        | 4.75    | 2         | 140      | 5.4     | 34           | 2.38                              | 2.40 |
| 6             | 6       | 45        | 5       | 2.1       | 150      | 5.5     | 35           | 2.54                              | 2.56 |
| 7             | 6.25    | 46        | 5.25    | 2.2       | 160      | 5.6     | 36           | 2.70                              | 2.72 |
| 8             | 6.5     | 47        | 5.5     | 2.3       | 170      | 5.7     | 37           | 2.86                              | 2.88 |
| 9             | 6.75    | 48        | 5.75    | 2.4       | 180      | 5.8     | 38           | 3.03                              | 3.05 |
| 10            | 7       | 49        | 6       | 2.5       | 190      | 5.9     | 39           | 3.20                              | 3.22 |
| 11            | 7.25    | 50        | 6.25    | 2.6       | 200      | 6       | 30           | 3.37                              | 3.39 |
| 12            | 7.5     | 51        | 6.5     | 2.7       | 190      | 6.1     | 31           | 3.55                              | 3.57 |
| 13            | 7.75    | 52        | 6.75    | 2.8       | 180      | 6.2     | 32           | 3.74                              | 3.76 |
| 14            | 8       | 53        | 7       | 2.9       | 170      | 6.3     | 33           | 3.92                              | 3.94 |
| 15            | 8.25    | 54        | 7.25    | 3         | 200      | 6.4     | 34           | 4.11                              | 4.13 |
| 16            | 8.5     | 55        | 7.5     | 3.1       | 190      | 6.5     | 35           | 4.31                              | 4.33 |
| 17            | 8.75    | 56        | 7.75    | 3.2       | 180      | 6.6     | 36           | 4.51                              | 4.53 |
| 18            | 9       | 57        | 8       | 3.3       | 170      | 6.7     | 37           | 4.71                              | 4.73 |
| 19            | 9.25    | 58        | 8.25    | 3.4       | 200      | 6.8     | 38           | 4.91                              | 4.93 |
| 20            | 9.5     | 59        | 8.5     | 3.5       | 190      | 6.9     | 39           | 5.12                              | 5.14 |

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 3.**

| №<br>варианта | $H$ , м | $Q$ , л/с | $R$ , м | $v$ , м/с | $m$ , кг | $L$ , м | $\alpha$ , ° | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт в) |      |
|---------------|---------|-----------|---------|-----------|----------|---------|--------------|-----------------------------------|------|
| 1             | 6       | 40        | 3.5     | 1.6       | 100      | 5       | 30           | 1.95                              | 1.97 |
| 2             | 5       | 41        | 4       | 1.7       | 110      | 5.1     | 31           | 2.26                              | 2.28 |
| 3             | 5.25    | 42        | 4.25    | 1.8       | 120      | 5.2     | 32           | 2.58                              | 2.60 |
| 4             | 5.5     | 43        | 4.5     | 1.9       | 130      | 5.3     | 33           | 2.93                              | 2.95 |
| 5             | 5.75    | 44        | 4.75    | 2         | 140      | 5.4     | 34           | 3.30                              | 3.32 |
| 6             | 6       | 45        | 5       | 2.1       | 150      | 5.5     | 35           | 3.70                              | 3.72 |
| 7             | 6.25    | 46        | 5.25    | 2.2       | 160      | 5.6     | 36           | 4.12                              | 4.14 |
| 8             | 6.5     | 47        | 5.5     | 2.3       | 170      | 5.7     | 37           | 4.56                              | 4.58 |
| 9             | 6.75    | 48        | 5.75    | 2.4       | 180      | 5.8     | 38           | 5.03                              | 5.05 |
| 10            | 7       | 49        | 6       | 2.5       | 190      | 5.9     | 39           | 5.52                              | 5.54 |
| 11            | 7.25    | 50        | 6.25    | 2.6       | 200      | 6       | 30           | 4.69                              | 4.71 |
| 12            | 7.5     | 51        | 6.5     | 2.7       | 190      | 6.1     | 31           | 4.67                              | 4.69 |
| 13            | 7.75    | 52        | 6.75    | 2.8       | 180      | 6.2     | 32           | 4.63                              | 4.65 |
| 14            | 8       | 53        | 7       | 2.9       | 170      | 6.3     | 33           | 4.56                              | 4.58 |
| 15            | 8.25    | 54        | 7.25    | 3         | 200      | 6.4     | 34           | 5.60                              | 5.62 |
| 16            | 8.5     | 55        | 7.5     | 3.1       | 190      | 6.5     | 35           | 5.54                              | 5.56 |
| 17            | 8.75    | 56        | 7.75    | 3.2       | 180      | 6.6     | 36           | 5.46                              | 5.48 |
| 18            | 9       | 57        | 8       | 3.3       | 170      | 6.7     | 37           | 5.36                              | 5.38 |
| 19            | 9.25    | 58        | 8.25    | 3.4       | 200      | 6.8     | 38           | 6.55                              | 6.57 |
| 20            | 9.5     | 59        | 8.5     | 3.5       | 190      | 6.9     | 39           | 6.46                              | 6.48 |

**Матрица параметров и ответов к вариантам задания 3.**

| №<br>варианта | $H$ , м | $Q$ , л/с | $R$ , м | $v$ , м/с | $m$ , кг | $L$ , м | $\alpha$ , ° | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт г) |     | Ответ<br>в диапазоне<br>(пункт д) |      |
|---------------|---------|-----------|---------|-----------|----------|---------|--------------|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|------|
| 1             | 6       | 40        | 3.5     | 1.6       | 100      | 5       | 30           | 6.2                               | 6.4 | 24.1                              | 24.5 |
| 2             | 5       | 41        | 4       | 1.7       | 110      | 5.1     | 31           | 6.4                               | 6.6 | 30.3                              | 30.7 |
| 3             | 5.25    | 42        | 4.25    | 1.8       | 120      | 5.2     | 32           | 6.5                               | 6.7 | 32.2                              | 32.6 |
| 4             | 5.5     | 43        | 4.5     | 1.9       | 130      | 5.3     | 33           | 6.7                               | 6.9 | 33.9                              | 34.3 |
| 5             | 5.75    | 44        | 4.75    | 2         | 140      | 5.4     | 34           | 6.9                               | 7.1 | 35.7                              | 36.1 |
| 6             | 6       | 45        | 5       | 2.1       | 150      | 5.5     | 35           | 7.0                               | 7.2 | 37.3                              | 37.7 |
| 7             | 6.25    | 46        | 5.25    | 2.2       | 160      | 5.6     | 36           | 7.2                               | 7.4 | 38.9                              | 39.3 |
| 8             | 6.5     | 47        | 5.5     | 2.3       | 170      | 5.7     | 37           | 7.3                               | 7.5 | 40.5                              | 40.9 |
| 9             | 6.75    | 48        | 5.75    | 2.4       | 180      | 5.8     | 38           | 7.5                               | 7.7 | 42.0                              | 42.4 |
| 10            | 7       | 49        | 6       | 2.5       | 190      | 5.9     | 39           | 7.6                               | 7.8 | 43.5                              | 43.9 |
| 11            | 7.25    | 50        | 6.25    | 2.6       | 200      | 6       | 30           | 6.8                               | 7.0 | 34.9                              | 35.3 |
| 12            | 7.5     | 51        | 6.5     | 2.7       | 190      | 6.1     | 31           | 7.0                               | 7.2 | 32.8                              | 33.2 |
| 13            | 7.75    | 52        | 6.75    | 2.8       | 180      | 6.2     | 32           | 7.2                               | 7.4 | 30.8                              | 31.2 |
| 14            | 8       | 53        | 7       | 2.9       | 170      | 6.3     | 33           | 7.3                               | 7.5 | 28.8                              | 29.2 |
| 15            | 8.25    | 54        | 7.25    | 3         | 200      | 6.4     | 34           | 7.5                               | 7.7 | 33.7                              | 34.1 |
| 16            | 8.5     | 55        | 7.5     | 3.1       | 190      | 6.5     | 35           | 7.6                               | 7.8 | 31.7                              | 32.1 |
| 17            | 8.75    | 56        | 7.75    | 3.2       | 180      | 6.6     | 36           | 7.8                               | 8.0 | 29.8                              | 30.2 |
| 18            | 9       | 57        | 8       | 3.3       | 170      | 6.7     | 37           | 7.9                               | 8.1 | 27.9                              | 28.3 |
| 19            | 9.25    | 58        | 8.25    | 3.4       | 200      | 6.8     | 38           | 8.1                               | 8.3 | 32.6                              | 33.0 |
| 20            | 9.5     | 59        | 8.5     | 3.5       | 190      | 6.9     | 39           | 8.2                               | 8.4 | 30.7                              | 31.1 |